

VŠB – Technická univerzita OSTRAVA
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra Fyziky

Optimalizace vrtání a řezání těžkoobrobitelných materiálů

**Optimizing of drilling and through-cutting of hard-machined
materials**

2020

Martin Tyč

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. Martin Tyč

Studijní program:

N0533A110006 Aplikovaná fyzika

Téma:

Optimalizace vrtání a řezání těžkoobrobitelných materiálů
Optimizing of drilling and through-cutting of hard-machined materials

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

Cílem diplomové práce je navrhnout pracovní postup, který zejména při práci s těžkoobrobitelnými materiály umožní snížit časovou náročnost a spotřebu abraziva, a tak optimalizovat technologický postup. Teoretická část práce by se měla zaměřit na dva dílčí úkoly

1) návrh parametrů řezání, resp. vrtání na základě známých vlastností materiálu, včetně případných zkušebních řezů,

2) návrh on-line monitorování průběhu řezání, resp. vrtání s cílem okamžité detekce nedořezů.

Při zpracování teoretické části je třeba zohlednit teorii porušování materiálu, teorii zpracování signálu, zákony zachování energie a hybnosti a využít teoretické i praktické znalosti získané při zpracování bakalářské práce: Měření vibrační řezné hlavičky při použití různých druhů abraziva.

Seznam doporučené odborné literatury:

Horák K.: Úvod do zpracování signálů, dostupné na http://midas.uamt.feec.vutbr.cz/ZVS/Lectures/01_Uvod_do_zpracovani_signalu.pdf

Jiří J.: Číslicová filtrace, analýza a restaurace signálů, Vutium 2002

Sheng M., Tian S., Zhang B., Ge H., 2019, Frequency analysis of multi-sources acoustic emission from high-velocity waterjet rock drilling and its indicator to drilling efficiency, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 115, 137-144

Teti R., Jemielniak K., O'Donnell G., Dornfeld D., 2010, Advanced monitoring of machining operations, CIRP Annals, 59(2), 717-739

Hassan A.I., Chen C., Kovacevic R., 2004, On-line monitoring of depth of cut in AWJ cutting, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 44, 595-605


Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Irena Hlaváčová, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2019

Datum odevzdání: 30.04.2020

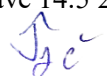



prof. Dr. RNDr. Jiří Luňáček
vedoucí katedry


prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.
děkan fakulty

„Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“

V Ostravě 14.5 2020



.....

podpis

Tímto děkuji vedoucí práce doc. Ing. Ireně Hlaváčové, Ph.D. za konzultace, cenné rady a lidský přístup při psaní diplomové práce a při realizaci experimentů. Také děkuji vedoucímu laboratoře kapalinového paprsku prof. Ing. Liboru Hlaváčovi, Ph.D. za rady a pomoc při měřeních.

Práce vznikla za podpory projektu Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy ČR SP 2020/45 Diagnostika, charakterizace a modelování vybraných materiálů a jejich fyzikální vlastností.

Abstrakt

V diplomové práci částečně navazuji na svoji bakalářskou práci. V této práci však měřím vibrace pomocí tří akcelerometrů umístěných na obrobku. Akcelerometry jsou upevněny k obrobku pomocí speciálního hranolku, který jsem navrhl. V teoretické části se zabývám částečně popisem vodního abrazivního paprsku, dále se zabývám problematikou řezu. Důležitou částí je makroskopický popis interakčního procesu a prohloubení fyzikální charakteristiky problému. Nedílnou součástí práce je kapitola, která se zabývá vibracemi, protože jsou použity jako klíčový nástroj, pomocí kterého můžeme monitorovat průběh řezání vodním abrazivním paprskem. S tím souvisí i vyhodnocení důležitých publikací, které se zabývají stejnou nebo podobnou problematikou. V následující praktické části popisuji samotný experiment a jeho jednotlivé důležité součásti. Po naměření dat pomocí Signal Express tato data dále zpracovávám v LabVIEW. Pro online monitoring vibrací používám program LabVIEW, který obsahuje toolkit k tomu určený.

Klíčová slova: vodní abrazivní paprsek, vibrace, LabVIEW, Signal Express

Abstract

In my thesis I partly follow up my bachelor thesis. In the submitted work I measure vibrations by three accelerometers placed on the workpiece. The accelerometers are attached to the workpiece by a special prism designed and made by myself. In the theoretical part I deal with the description of abrasive water jet, and then I study details of cutting description. An important part is the macroscopic physical description of the interaction process. An integral part of the work is a chapter that deals with the vibrations which are used for AWJ cutting monitoring. The evaluation of the important publications dealing with the same or similar issues is included. The experimental part with the detailed description of the important components follows. The results of measurement are collected by Signal Express program and the data are then processed in LabVIEW. A special LabVIEW toolkit is utilized for online monitoring of vibrations.

Key words: abrasive water jet, vibration, LabVIEW, Signal Express

Obsah

Seznam použitých fyzikálních veličin.....	8
Seznam ilustrací.....	11
Seznam tabulek.....	12
Úvod.....	13
1 Vodní abrazivní paprsek	14
1.1 Popis stroje	14
1.1.1 Vysokotlaká čerpadla	15
1.1.2 Řezná hlavice.....	15
1.2 Problematika řezu	16
1.2.1 Dynamic Waterjet	17
1.2.2 ProgressJet.....	17
1.2.3 3D řezná hlavice	17
1.2.4 Fyzikální modely a vztahy.....	18
1.2.5 Vliv struktury materiálů na interakční procesy	22
2 Vibrodiagnostika	24
2.1 Dělení vibrací dle typu buzení.....	24
2.1.1 Periodicky buzené kmitání	24
2.1.2 Impulsně buzené kmitání.....	25
2.1.3 Kmitání buzené silou náhodného průběhu	25
2.2 Akcelerometry	25
2.2.1 Piezoelektrický akcelerometr.....	26
2.2.2 Akcelerometr PCB model 352C33.....	27
2.3 Signál	28
3 Shrnutí literární rešerše.....	29
3.1 Senzory při obrábění	29
3.2 Měření akustických a vibračních signálů	30
3.3 Měření akustických emisí u čistého vodního paprsku.....	32
3.4 Akustické emise při vrtání těžkoobrobitelných materiálů.....	33
4 Experimentální část	34
4.1 Záznam měření	34
4.2 Měření vibrací.....	35
4.3 Zpracování signálu.....	36

4.3.1	Spektrální hustota výkonu	36
4.3.2	Efektivní hodnota.....	38
4.3.3	Software.....	38
4.4	Vyhodnocení měření.....	39
4.4.1	Měření vibrací na stejném druhu materiálu o různých tloušťkách.....	39
4.4.2	Měření vibrací na duralu při různých parametrech paprsku	47
4.5	Návrh pracovního postupu	54
Závěr		56
Bibliografie.....		58
Seznam příloh		62

Seznam použitých fyzikálních veličin

A [m^2]	vyfrézovaný průřez v rovině kolmé k pohybu hlavičky
AE_{rms}	RMS (root mean square) energie akustických vln
a [m]	střední velikost základní stavební jednotky materiálu – částice
a_n [m]	střední velikost částic vznikajících při směšovacím procesu
C_5	součinitel upravující výkon paprsku vzhledem k měnícímu se obsahu abraziva pod saturační hladinou (nad ní se výkon paprsku nezvětšuje)
C_f	součinitel odporu elementu (částice) materiálu vůči paprsku
D [m]	délka usměrňovací trubice
d [m]	průměr usměrňovací trubice - obrázek 3
d_0 [m]	průměr vodní trysky
E_A [J]	energie spotřebovaná na práci sil překonávajících pevnost materiálu
E_{awj} [J]	energie AWJ
E_e [J]	energie ztracená expanzí kapaliny
E_k [J]	kinetická energie kapaliny
E_L [J]	energie paprsku ve vzdálenosti L od výstupu z trysky
\tilde{E}_L [J]	kinetická energie paprsku opouštějícího interakční prostor, je-li povrch materiálu ve vzdálenosti L od výstupu z trysky
E_M [J]	kinetická energie materiálu rozrušeného paprskem v interakčním prostoru
E_Q [J]	energie paprsku přeměněná při interakci s materiálem na teplo
E_r [J]	energie spotřebovaná na překonávání odporu prostředí
E_Z [J]	energie paprsku ztracená při interakci s materiálem vlivem tření
F [N]	síla
f [Hz]	frekvence
$f(t)$	harmonická síla
g [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$]	tíhové zrychlení
H [m]	tloušťka materiálu
h [m]	hloubka porušení materiálu (resp. okamžitá hloubka řezu); v obrázku 3 také výška materiálu
h_l [m]	výška vodní hladiny nad ústím výtokového otvoru
h_{s0} [m]	vzdálenost ústí trubice od obrobku – obrázek 3
h_{sc} [m]	hladká oblast - obrázek 3
k [$\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$]	tuhost
k^* [m^2]	"dynamická" propustnost materiálu
L [m]	vzdálenost povrchu materiálu nebo vyšetřované roviny kolmé k ose paprsku od výstupního ústí kapalinové trysky (usměrňovací trubice)
l_{dr} [m]	posun výstupu paprsku oproti tečně vstupu - obrázek 3

m [kg]	hmotnost
m_a [kg·s ⁻¹]	hmotnostní průtok abraziva
m_w [kg·s ⁻¹]	hmotnostní průtok kapaliny
P_{awj} [W]	výkon AWJ absorbovaný v materiálu
p [Pa]	tlak vody
p_a [Pa]	tlak prostředí, do něhož paprsek vstupuje
p_0 [Pa]	tlak kapaliny před tryskou (v čerpadle)
p_j [Pa]	tlak určený z hustoty a rychlosti abrazivního paprsku
p_z [Pa]	ztrátový tlak
S_p	poměr neporušených nebo poruchy neobsahujících zrn k celkovému množství abrazivních zrn
S_M [m ²]	plocha, na které vytváří paprsek porušení překonáním pevnosti materiálu
T [s]	perioda
t [s]	čas
u [m·s ⁻¹]	rychlost pojezdu
V [m ³]	objem odebraného materiálu
V_o [m ³]	objem kapaliny
V_M [m ³]	objem materiálu interagující s kapalinou
\tilde{V} [m ³]	objem kapaliny vystupující z interakčního prostoru
v [m·s ⁻¹]	rychlost
v_a [m·s ⁻¹]	rychlost abrazivního paprsku na výstupu z usměrňovací trubice
v_L [m·s ⁻¹]	rychlost ve vzdálenosti L od výstupního ústí trysky
v_M [m·s ⁻¹]	rychlost porušování materiálu
v_p [m·s ⁻¹]	rychlost posuvu stopy paprsku po povrchu materiálu
v_{pM} [m·s ⁻¹]	modifikovaná rychlost posuvu stopy paprsku po povrchu materiálu
v_0 [m·s ⁻¹]	rychlost kapalinového paprsku bez přísad na výstupu trysky
\tilde{v}_L [m·s ⁻¹]	rychlost paprsku po interakci ve vzdálenosti L od výstupního ústí trysky
$x(t)$ [m]	výchylka vynuceného kmitání
x_0 [m]	amplituda vynuceného kmitání
y_{ef}	efektivní hodnota veličiny y
y	veličina y
α	součinitel ztráty rychlosti paprsku v interakčním procesu s materiálem
γ [Pa ⁻¹]	stlačitelnost kapaliny při tlaku p_o
γ_R	zkrácený vztah $(1 - \gamma p_o)$
δ_e	součinitel účinnosti transformace hybnosti ve směšovacím procesu
η [N·s·m ⁻²]	dynamická viskozita kapaliny
θ ; τ ; Δ ; ε	empirické konstanty v článku [1]

θ [rad]	úhel mezi osou paprsku a kolmicí v bodu, kde osa paprsku protne povrch materiálu, v rovině proložené těmito přímkami
λ	součinitel ztráty třením
μ	ztrátový součinitel trysky
ξ [m ⁻¹]	součinitel útlumu kapalinového paprsku v prostředí mezi ústím trysky a povrchem materiálu
ξ_j [m ⁻¹]	součinitel útlumu abrazivního paprsku v prostředí mezi ústím usměrňovací trubice a povrchem materiálu
ρ [kg·m ⁻³]	hustota stlačené kapaliny
ρ_0 [kg·m ⁻³]	hustota kapaliny za normálních podmínek
ρ_j [kg·m ⁻³]	hustota abrazivního paprsku (přepočet na homogenní prostředí)
ρ_M [kg·m ⁻³]	měrná hmotnost obráběného materiálu objemová (včetně pórů)
ρ_M^* [kg·m ⁻³]	měrná hmotnost porušovaného materiálu
σ_s [Pa]	pevnost materiálového elementu ve smyku
σ_t [Pa]	pevnost v tahu
σ_M [Pa]	mechanické napětí způsobené odporem materiálu vůči proudu kapaliny
Φ [rad]	úhel paprsku oproti povrchu obrobku - obrázek 3
φ	fázový posun
φ_F	počáteční fázový posun budící síly
χ	součinitel rozšíření paprsku vlivem interakce s materiálem
ω [rad·s ⁻¹]	vlastní úhlová frekvence

Seznam ilustrací

Obrázek 1 CNC stůl a technologie AWJ [7]	14
Obrázek 2 Druhy řezných hlavic [9]	15
Obrázek 3 Schéma striací [7].....	16
Obrázek 4 Schéma generace kapalinového abrazivního paprsku [20].....	21
Obrázek 5 Vynucené kmitání harmonickou budící silou [23]	25
Obrázek 6 Vynucené kmitání budící silou A) impulsního a B) náhodného průběhu [23]	25
Obrázek 7 Schéma piezoelektrického akcelerometru	26
Obrázek 8 Křivka frekvenční odezvy [25]	27
Obrázek 9 PCB akcelerometr ICP® [27]	28
Obrázek 10 NI PXIe-1073.....	34
Obrázek 11 Ni ExpressCard8360.....	35
Obrázek 12 Upevnění hranolku pomocí magnetu.....	35
Obrázek 13 Detail hranolku upevněného na rámečku.....	36
Obrázek 14 Výkonové spektrum	37
Obrázek 15 Výkonové spektrum s viditelnou frekvencí motoru	38
Obrázek 16 Analýza časové závislosti	39
Obrázek 17 Upevnění akcelerometrů na vzorku.....	40
Obrázek 18 Ukázka řezů	40
Obrázek 19 Q-Q grafy skupin.....	43
Obrázek 20 Závislost RMS na rychlosti posuvu.....	45
Obrázek 21 Q-Q grafy akcelerometrů.....	46
Obrázek 22 Umístění řezu	48
Obrázek 23 Řez A: $v_p = 25 \text{ mm/min}$	49
Obrázek 24 Řez A: $v_p = 50 \text{ mm/min}$	50
Obrázek 25 Řez A: $v_p = 75 \text{ mm/min}$	50
Obrázek 26 Řez A: $v_p = 100 \text{ mm/min}$	51
Obrázek 27 Porovnání spodní strany řezů	51
Obrázek 28 Lineární závislost pro $v_p = 150\text{-}300 \text{ mm/min}$	52
Obrázek 29 Lineární závislost pro $v_p = 20\text{-}100 \text{ mm/min}$	52
Obrázek 30 Online monitoring řezu.....	55

Seznam tabulek

Tabulka 1 Technické údaje [26]	28
Tabulka 2 RMS jednotlivých řezů Ostrava	41
Tabulka 3 Rozdělení dat do kategorií	41
Tabulka 4 Výběrové charakteristiky RMS řezů.....	42
Tabulka 5 POST-HOC analýza řezů	44
Tabulka 6 Efekt řezů	44
Tabulka 7 Výběrové charakteristiky RMS akcelerometrů Ostrava	45
Tabulka 8 POST-HOC analýza akcelerometrů Ostrava.....	47
Tabulka 9 Efekt akcelerometrů Ostrava	47
Tabulka 10 RMS řezů Milano	49
Tabulka 11 RMS pro určité rychlosti posuvu	52
Tabulka 12 Výběrové charakteristiky RMS akcelerometrů Milano	53
Tabulka 13 POST-HOC analýza akcelerometrů Milano	54
Tabulka 14 Efekt akcelerometrů Milano	54

Úvod

Abrazivní vodní paprsek (AWJ) je jednou z progresivních technologií porušování materiálů. Tato technologie se již rozšířila do mnoha odvětví průmyslu. Počátek AWJ sahá do konce 70. let 20. století, kdy Hashish začal přidávat abrazivo do paprsku, a tak dosáhl vysoké účinnosti, takže na začátku 80. let už bylo možné začít řezat ocel, beton apod. [2]. Existují dvě hlavní technologie AWJ. Nejrozšířenější technologie je ejektorový paprsek využívající Venturiho efektu, popsany blíže v kapitole 1.1.2. Druhá technologie je takzvaný suspenzní paprsek, kdy je směs vody a abraziva tlakována předem a ta potom prochází speciální řeznou hlavicí.

Hlavními výhodami AWJ je zanedbatelné tepelné ovlivnění materiálů, prakticky nulové navýšení vnitřního pnutí materiálu a univerzálnost paprsku jako nástroje schopného porušovat téměř každý materiál. Samotná technologie stroje je díky vývoji probíhajícímu u mnoha firem na svém vrcholu. Avšak kvůli stále se rozšiřujícímu trhu a větší poptávce po dělení nejrozličnějších materiálů, 3D obrábění a obrábění těžkoobrobitelných a tlustých materiálů se prohlubuje potřeba monitorování procesu řezu. Tímto tématem se zabývá řada autorů, např. Axinte monitoruje vodní paprsek pomocí akustické emise (AE) a dynamometru [3], Krenický měří vibrace na různých částech stroje [4], Hreha měří vibrace na obrobku [5] a Mikler se zabývá monitoringem nedořezů pomocí akustických emisí [6]. Doposud nebylo uvedeno na trh komerčně vyráběné zařízení, které by monitorovalo řez vodním paprskem. Žádné dosud publikované experimenty nenavrhly konečné zařízení, které by hlavní výrobci vodních paprsků mohli uvést v praxi. Ani při školení u firmy PTV jsem se nesetkal s konkrétním prodávaným zařízením, které by bylo schopno monitorovat řez.

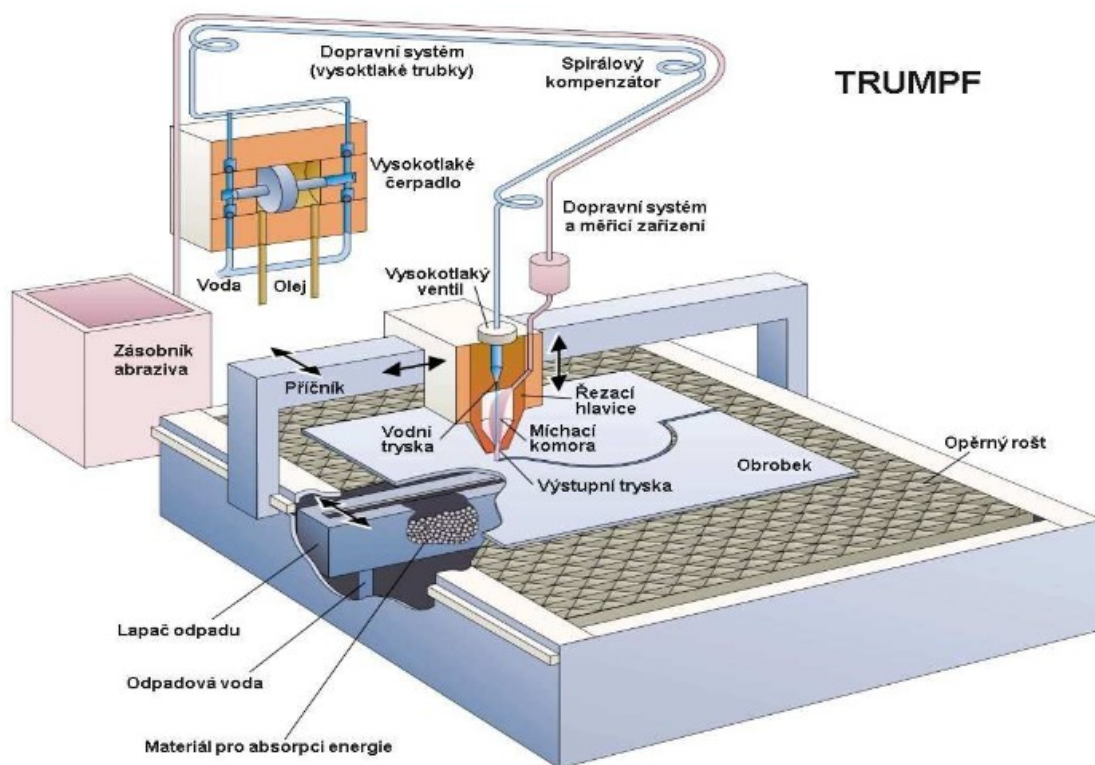
Pro práci nejen v průmyslu, ale také v laboratořích, které studují vodní paprsek, by bylo velkým přínosem mít technologii schopnou online monitorovat hloubku řezu obrobku. Vodní paprsek je schopný řezat tlusté materiály jako je ocel nebo hornina, avšak při velmi tlustých a těžkoobrobitelných materiálech bývá složité správně určit parametry tak, aby byl paprsek schopný materiál prořezat zcela po celé délce a zároveň takovýto řez byl ekonomicky únosný. Řez určený jen pro dělení materiálu, kdy není dbáno na jeho kvalitu, je velmi používaný a čas strávený při takovémto řezu může být zbytečně dlouhý. Online monitoring řezu by měl přinést jasné odpovědi na to, v jaké hloubce se paprsek nachází například při vrtu a jestli při dělení materiálu vznikají nedořezy, nebo paprsek daný materiál prořezává zbytečně dlouho a neekonomicky.

V této práci se zabývám měřením vibrací pomocí piezoelektrických akcelerometrů připevněných na obrobek. Tyto vibrace by měly pomoci při monitoringu řezu těžkoobrobitelného materiálu a tím dopomoci k ušetření abraziva a času při práci v laboratoři. Experimenty probíhaly na dvou pracovištích, kde pro zjištění souvislostí vibrací a řezu byla použita měřicí soustava od National Instruments a piezoelektrické akcelerometry od PCB. Hlavní experiment s návrhem parametrů řezu probíhal v laboratoři kapalinového paprsku Katedry fyziky a druhý experiment probíhal během méj praktické stáže v Politecnico di Milano. Cílem bylo najít souvislosti vibrací s řezem materiálu a z výsledků navrhnout systém online monitorování řezů, který by bylo možné používat v laboratoři kapalinového paprsku Katedry fyziky při řezu tlustých nebo těžkoobrobitelných materiálů. Důležitou součástí optimalizace vrtání a řezání těžkoobrobitelných materiálů je uvědomit si souvislosti mezi interakcí paprsku s materiálem a pozorovanými vibroakustickými emisemi a identifikovat jejich projevy v měřených signálech.

1 Vodní abrazivní paprsek

1.1 Popis stroje

Abrazivní vodní paprsek řadíme mezi nekonvenční technologie obrábění. Lze ho použít pro obrábění velkého množství různých materiálů. Obvykle se jedná o CNC stůl [X, Y, Z] s odpadní nádrží, na kterém je upevněná řezná hlavice, vysokotlaké čerpadlo vody a zásobník abraziva. Moderní stroje také mohou mít v CNC stole zabudované zařízení na rekuperaci abraziva, takže odpadní nádrž se tolik neplní odpadním abrazivem a případně je možno odpadní materiál dále zpracovávat a zčásti recyklovat. CNC stůl může být buď tříosý, nebo pětiosý. Základní princip AWJ je v úběru materiálu směsí vysokoenergetické vody a abrazivních částic. Cesta abrazivního paprsku začíná ve vodním čerpadle. Vysokotlaká voda je kapilárou přivedená k řezné hlavici, kde se generuje paprsek. Dopravní systém abraziva funguje u starších strojů odsypáváním přesného množství abraziva podavačem do odvětrané propojky s hadicí, odkud se abrazivo pod tlakem přisává do hlavice. Nové systémy fungují na přísunu abraziva do nádoby nad hlavicí, odkud si paprsek přisává přesné množství abraziva. Odpadní nádrž slouží hlavně k pohlcení zbytkové energie paprsku a také k uchování odpadů vzniklých při řezu. Schéma stroje AWJ lze vidět na obrázku 1.



Obrázek 1 CNC stůl a technologie AWJ [7]

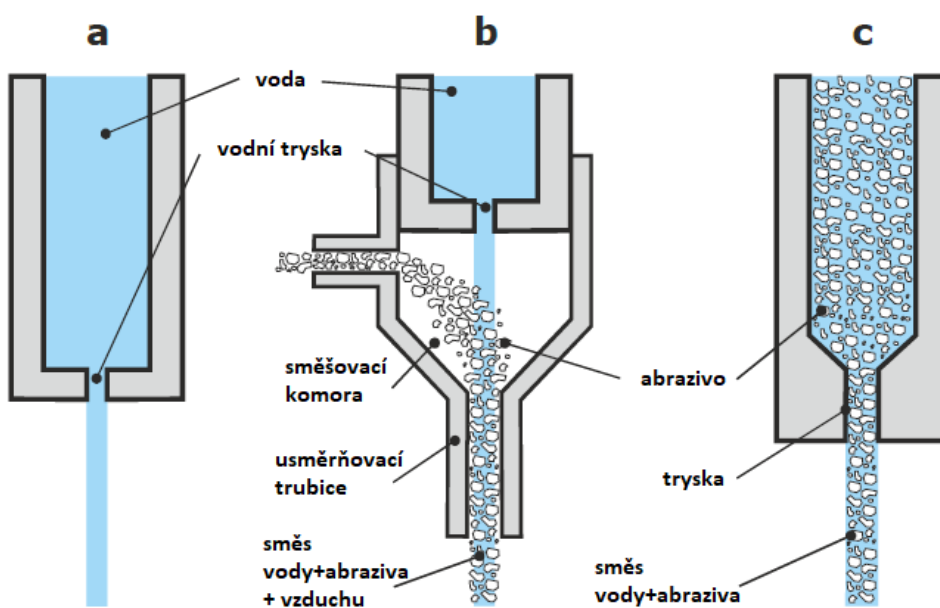
1.1.1 Vysokotlaká čerpadla

Používají se nejčastěji multiplikační čerpadla. Tento druh čerpadla se skládá ze dvou okruhů. Primární nízkotlaký olejový okruh zajišťuje pohyb velkého pístu v multiplikátoru. Sekundární vysokotlaký vodní okruh je složen ze zpětných ventilů a kapilár. Multiplikátor zajišťuje vysoký tlak vody v sekundárním okruhu díky Pascalovu zákonu transformací síly působící na velký píst v primárním okruhu. Vysokotlaká voda je díky multiplikátoru pulsující, takže je potřeba tyto pulzy vyhladit v akumulátoru. Akumulátor je vlastně válec o určitém objemu, kde se pulzy tlumí díky stlačitelnosti vody.

Alternativou k multiplikačnímu čerpadlu je hypexové čerpadlo, nebo plunžrové čerpadlo. Plunžrová čerpadla mají přímo hnané písty a jsou podobné pístovým motorům. Píst se pohybuje díky klikovému hřídeli, který je poháněn energií z elektromotoru. Písty potom ve svých válcích nasávají a stlačují kapalinu. Kapalina je hnána přes výstupní ventily do dalších částí systému. [8]

1.1.2 Řezná hlavice

Řezná hlavice ejektorové technologie, obrázek 2b, je složená z několika důležitých komponent. Samotný paprsek generuje vodní tryska, která je obvykle safírová, nebo diamantová. Diamantová tryska se vyznačuje vyšší životností, avšak safírová je levnější. Paprsek po opuštění trysky se dostává do směšovací komory. Paprsek má vysokou kinetickou energii, pohybuje se tedy velkou rychlostí a díky Venturiho efektu vytváří ve směšovací komoře podtlak. Do směšovací komory je tak přísáváno abrazivo z bočního přívodu. Po směšovacím procesu se paprsek dostává do další z důležitých částí, usměrňovací trubice. Někdy se říká usměrňovací trubici abrazivní tryska, ovšem tento termín je zavádějící a věcně nesprávný. Zde dochází k usměrnění toku paprsku a k jeho částečné fokusaci. Čistý vodní paprsek obrázek 2a a v úvodu zmíněný suspenzní vodní paprsek obrázek 2c směšovací komoru nepotřebují.



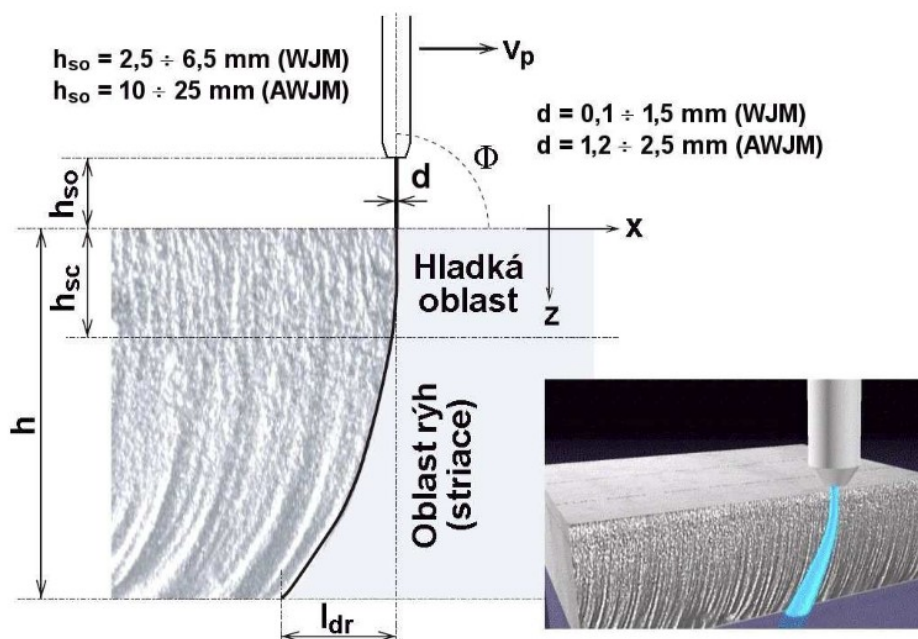
Obrázek 2 Druhy řezných hlavíc [9]

1.2 Problematika řezu

Při procesu řezu vodním paprskem se potýkáme s několika nežádoucími jevy, které vedou k tomu, že výsledný geometrický tvar nesouhlasí s definovaným tvarem. Trajektorie paprsku se mění během průchodu materiálem v závislosti na parametrech paprsku a v závislosti na materiálu. Vstupní souřadnice paprsku do materiálu jsou odlišné od výstupních souřadnic paprsku z materiálu. [2]

Touhle problematikou se zabýval například Orbanic, který studuje striace [10], Strnadel a kolektiv, který se ve svém článku zabývá deklinačním úhlem [11], Hlaváč a kolektiv, který se zabývá kvalitou řezu [12] a studoval problematiku úhlové chyby [13].

Při lineárním řezu materiálu se můžeme setkat se zvlněním povrchu řezu, které souvisí s dynamikou paprsku. Zvlnění nazýváme odborně striace, viz obrázek 3. Ty vznikají na ploše řezu z důvodu kolísání tlaku. Následná změna rychlosti toku paprsku zapříčiní právě tento druh zvlnění. Tento fenomén se zvětšuje při zvyšování rychlosti řezu a snižování tlaku. Zvýšením tlaku, snížením rychlosti a zvýšením průtoku abraziva můžeme striace do určité míry potlačit. Pro popis striace definujeme deklinační úhel jako úhel mezi normálou povrchu a tečnou striace. Pro vyhodnocení kvality řezu je rozhodující právě deklinační úhel na výstupu paprsku z materiálu. Rychlost řezu ovlivňuje rovněž profil řezu, kdy při optimální rychlosti jsou hrany řezu rovnoběžné, při vysoké rychlosti konvergují a při nízké rychlosti divergují. Tyto jevy lze dobře eliminovat náklony řezné hlavy a volbou správných parametrů paprsku. [2]



Obrázek 3 Schéma striací [7]

Na koncích řezu a při změně směru řezu, například v rozích vznikají takzvané nedořezy. Tento jev úzce souvisí s negativními jevy popsányi výše u lineárního řezu. Jakmile vznikne nedořez,

je nutné obrobek buď odlomit, nebo místo nedořezu projet paprskem znovu. U obloukové trajektorie se samozřejmě projevují jevy popsané výše, ale zároveň se zde setkáváme i s problémem, který je dobře vidět na řezu válce. Při řezu válce vzniká těleso podobající se komolému kuželu, kdy dolní podstava má větší průměr než horní podstava. Tyto jevy lze opět dobře eliminovat náklony hlavice a správnými parametry paprsku. U řezu válce se nám však při běžné kompenzaci objevuje další jev, kdy vzniká místo válce soudek. Soudkovitost se moderními stroji, kdy se hlavice pohybuje a naklání ve třech dimenzích, dá opět významně potlačit, nebo dokonce odstranit. [2]

Pro eliminaci výše zmíněných negativních jevů se v praxi používá několik nástrojů, které v zásadě souvisí s náklony řezné hlavice.

1.2.1 Dynamic Waterjet

Tato technologie úklonu řezné hlavice je od firmy Flow. Úklon se mění podle požadavků na kvalitu řezu. Technologie je složená z nově vyvinutého pohybového systému a z nových matematických modelů řezu. Díky Dynamic Waterjet je možné i u tlustých materiálů dosáhnout tolerance $\pm 0,04$ mm a zvýšit rychlost řezu o 8 až 10 %. Princip je založen na sledování obrysu obrobku hlavicí ve třech dimenzích a podle kvality řezu se mění úhel sklonu hlavice. [7]

1.2.2 ProgressJet

Tato technologie od české firmy PTV je velmi podobná výše zmíněné technologii Dynamic Waterjet. Technologie je složená ze dvou kroků. První je vlastně naklápění řezné hlavice ve dvou rotačních směrech a ve spolupráci s lineárními osami [X, Y, Z] se realizují všechny potřebné pohyby. Druhá část je založená na technologických informacích zadaných obsluhou, podle kterých řídicí systém řídí pohyb všech 5 os a volí optimální pohyb. [7]

1.2.3 3D řezná hlavice

Díky tomuto zařízení je možné řezat ve 3D, resp. ve třech osách [X, Y, Z] ose rotace [C] až 360° a osy rotace [A] až $\pm 90^\circ$. Technologie je výhodná jak pro 3D řezy, tak pro 2D řezy. [7]

Tyto moderní „zlepšováky“ nejsou stoprocentní zárukou spolehlivého prořezání tlustých, či těžkoobrobitelných materiálů. Pomáhají hlavně u tvarově složitých řezů. Také je možné docílit určité kvality řezných ploch a do určité míry eliminovat nedořezy. V praxi se však často stává, že u tlustých materiálů nebo těžkoobrobitelných materiálů se při dělicím řezu, kdy není potřeba z ekonomického hlediska dodržet lepší kvalitu řezu, může projevit několik úskalí:

- vyřezaný díl není zcela oddělený od okolního materiálu kvůli nedořezu
- u válcových dílů může vzniknout takový tvar, který zabraňuje vytažení ven a musí se tak zvedat celý materiál
- nehomogenita materiálu může způsobit nedořezy, takže se řez musí opakovat

Naklápění hlavice sice pomáhá k odstranění potíží při řezu, avšak pro hladký průběh řezu je potřeba další podpůrný systém monitoringu. Výše zmíněné problémy by se měly eliminovat díky systému online monitorování průběhu řezu materiálu pomocí akcelerometrů. Například při dělicím řezu by bylo možné v průběhu řezání zoptimalizovat rychlost, aby se zamezilo nedořezu na konci dělení materiálu. Online monitorovací systém by také měl být schopen identifikovat případné nedořezy, neboli můstky během řezu.

Pro nastavení správných parametrů řezu se v praxi využívají většinou defaultně přednastavená data dané firmy v softwaru. Například firma PTV pro výpočet parametrů používá takzvanou obrobiteľnosť, která se zkouší optimalizační zkouškou. V praxi zůstává průtok abraziva a tlak vody konstantní a mění se rychlost posuvu. Při vrtání děr se většinou používá tlak a průtok abraziva menší.

Optimalizační zkouška je vhodný nástroj pro zjištění správné rychlosti posuvu. Rychlost řezu upravujeme různými metodami, například pomocí modelu Hlaváče [14], nebo například firma PTV má ke stažení program [15], kdy po zadání proměnných včetně obrobiteľnosti program vypočte přibližnou drsnost povrchu řezu. V laboratoři katedry fyziky se používá pro úpravu rychlosti posuvu model vedoucího laboratoře, profesora Hlaváče. Ve své práci jsem parametry určil pomocí optimalizační zkoušky, kdy jsme ze zkušenosti nechali průtok abraziva a tlak vody nastavený dle zvyku, prvotní nástřel rychlosti posuvu jsme určili ze zkušenosti řezu obdobných materiálů. Poté jsem rychlosti posuvu zoptimalizoval na základě posouzení kvality zkušební řezu. Pro experiment bylo nezbytné zajistit, aby vznikaly nedořezy, viz následující kapitola.

1.2.4 Fyzikální modely a vztahy

V současné době se v praxi využívají tři hlavní modely interakce kapalinového paprsku s obrobkem. Model, který využívá firma Flow International je od Hashishhe. Ten má svůj model postavený na interakci abraziva s různě šikmými plochami [16], [17], [18]. Další model je experimentální práce Zenga a Kima. Model je založen na regresní analýze naměřených dat [19]. Tento model používá firma KMT. V laboratoři kapalinového paprsku Katedry fyziky používáme třetí model interakce kapalinového paprsku s obrobkem, který pochází od Hlaváče [14]. [20]

Proces makroskopického popisu interakčního procesu čistého kapalinového paprsku Hlaváče je založen na transformaci kinetické energie paprsku do práce síly, která působí porušení materiálu a transformaci hybnosti do impulzu této síly. Pomocným fyzikálním pilířem tohoto modelu je zákon zachování hmotnosti [20]. Kinetická energie paprsku je ovlivněna pouze parametry paprsku, takže můžeme vyloučit vliv účinnosti stroje. Pro zjištění účinnosti paprsku je tohle kritérium důležité. Další kritérium je, že tlak kapaliny považujeme za konstantní. Změnu energie kapaliny po průchodu tryskou popisujeme Bernoulliho rovnicí [21]:

$$\frac{1}{2}\rho v^2 = (p_0 - p_z - p_a) + \rho h_l g \quad (1)$$

Tlak kapaliny v agregátu p_0 je mnohem větší než ostatní tlaky, proto je zanedbáváme. [21] Výsledná rovnice má tedy tvar:

$$\frac{1}{2}\rho v^2 = p_0 \quad (2)$$

Při další úpravě rovnice je třeba si uvědomit, že jakmile kapalina opustí ústí trysky, dochází k její expanzi a tím i ztrátě energie [21]:

$$\frac{1}{2}\rho v^2 = \mu p_0(1 - \gamma p_0) \quad (3)$$

Kinetická energie v ústí trysky je definovaná vztahem vycházejícím z Bernoulliho rovnice (1) [21]:

$$E_k = \frac{1}{2}\rho \frac{\pi d_0^2}{4} v_0 t v_0^2 \quad (4)$$

Sloupec stlačené kapaliny po opuštění trysky díky zmíněné rychlé expanzi ztrácí část energie v podobě potenciální energie vzniklé stlačením kapaliny v agregátu. Hustota se po expanzi snižuje na hodnotu odpovídající volnému toku, průřez toku a objem se zvětšují, rychlost ve směru toku zůstává prakticky stejná. [22]

K další energetické ztrátě dochází, když paprsek překonává odpor prostředí, tuto ztrátu započítáváme až po expanzi. Paprsek podle teorie chápeme tak, že je složen ze dvou energetických částí o energii E_e a energii E_o . Energií E_o nese ta část kapaliny, která zůstala v původním kapalinovém sloupci i po expanzi. [22]

$$E_e = \frac{1}{2}\rho V_0 v_0^2 - \frac{1}{2}\rho_0 V_0 v_0^2 \quad (5)$$

$$E_o = \frac{1}{2}\rho_0 V_0 v_0^2 \quad (6)$$

Energií ve vzdálenosti L po opuštění ústí trysky můžeme tedy vyjádřit vztahem [22]:

$$E_L = E_k - E_e - E_r \quad (7)$$

Energií E_r určíme z odporu prostředí, kde se paprsek pohybuje. K tomu využijeme závislost rychlosti kapaliny na vzdálenosti ve směru pohybu, který lze určit podle rovnice [22]:

$$v_L = v_0 e^{-\xi L} \quad (8)$$

$$E_r = E_o - \frac{1}{2}\rho_0 V_0 v_L^2 \quad (9)$$

Výslednou energii E_L ve vzdálenosti L tedy můžeme definovat jako [22]:

$$E_L = \frac{1}{2}\rho_0 V_0 v_L^2 \quad (10)$$

Zákon zachování energie v soustavě paprsek - materiál definujeme rovnicí [22]:

$$E_L = \tilde{E}_L + E_M + E_A + E_Q + E_Z \quad (11)$$

Ta ukazuje, jak se při interakci přeměňuje energie definovaná vztahem (10).

Členy \tilde{E}_L , E_A a E_M lze analyticky vyjádřit pomocí měřitelných veličin na základě určitých fyzikálních předpokladů a aproximací. Členy E_Q a E_Z je složité stanovit, na základě praktických zkušeností s touto technologií, ale můžeme očekávat, že interakční časy jsou dostatečně krátké a okamžitá interakční oblast dostatečně malá na to, abychom mohli tyto členy pokládat vzhledem k ostatním za zanedbatelné. [22]

Po interakci paprsku s materiálem přicházíme o část energie kvůli odporové síle materiálu. Energie spotřebovaná k překonání pevnosti materiálu se definuje velikostí interakční plochy S_M , mechanickým napětím σ_M a hloubkou řezu h . Kinetickou energii odraženého paprsku definujeme pomocí vztahu (10) a změnou rychlosti v_L na \tilde{v}_L . Předpokladem je, že se nemění hustota kapaliny a platí zákon zachování hmotnosti. Objem kapaliny je během procesu konstantní. Kinetickou energii odebraného materiálu určíme hustotou materiálu ρ_M a jeho rychlostí v_M . [22]

Rovnici (11) můžeme přepsat do tvaru:

$$\frac{1}{2}\rho_0 V_0 v_L^2 = \frac{1}{2}\rho_0 \tilde{V} \tilde{v}_L^2 + \frac{1}{2}\rho_M V_M v_M^2 + \sigma_M S_M h \quad (12)$$

Pro čistý kapalinový paprsek prof. Hlaváč odvodil z rovnice (12) obecné vztahy pro výpočet hloubky úběru materiálu. Pro výpočet je nutné znát technologické možnosti a materiálové vlastnosti materiálu obrobku. Vzorec pro výpočet maximální hloubky drážky vytvořené pomocí čistého kapalinového paprsku [22] [20]:

$$h = \frac{\pi d_0 \sqrt{2\rho_0 \mu^3 p_0^3 \gamma_R^3 e^{-5\xi L} (1-\alpha^2) \cos \theta}}{4\chi \rho_M v_{PM}^{\frac{\rho_0}{\rho_M}} \left(\alpha^2 e^{-5\xi L} \mu p_0 \gamma_R + \frac{\rho_0}{\rho_M} \sigma \right)} \quad (13)$$

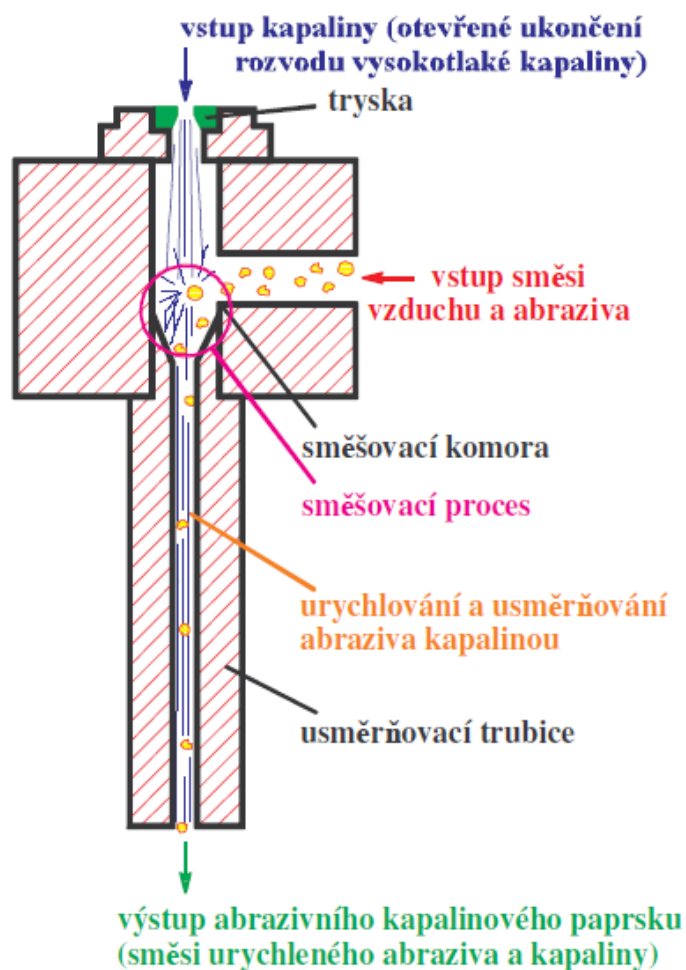
kde

$$\alpha = 1 - \frac{c_f^2 \sqrt{2\mu^3 p_0^3 \gamma_R^3 \rho_M^* k^*}}{8 \sqrt{\rho_0} \eta \sigma_s a e^{3\xi L}} \quad (14)$$

je součinitel účinnosti paprsku v interakci. Určen je na základě zákona zachování hybnosti soustavy (element kapaliny a element materiálu). [20]

S těmito vztahy úzce souvisí odvození vztahu pro abrazivní kapalinový paprsek. Vztahy a popis platí pro abrazivní paprsek využívající Venturiho efektu. Kvalitu a charakteristiku paprsku může hned na začátku ovlivnit kapalinová tryska, pomocí které transformujeme statickou tlakovou energii kapaliny na kinetickou energii. Hlavní parametry trysky, které mohou ovlivnit vysokoenergetický paprsek, jsou průměr, délka válcové části a kvalita stěn otvoru. Uvedené parametry současně s parametry kapaliny, jako jsou hustota a tlak, určují střední výstupní rychlost a rychlostní profil paprsku, konvergenci jádra paprsku a divergenci samotného paprsku. Po generaci paprsku pomocí zmíněné trysky paprsek vstupuje do směšovací komory, ve které díky Venturiho efektu vytváří podtlak. Do komory vstupuje minimálně jeden přívod, pomocí kterého je nasáváno abrazivo. Abrazivo se po vstupu do směšovací komory střetává s vysokoenergetickým kapalinovým paprskem. Směs kapaliny, vzduchu a abraziva poté vstupuje do usměrňovací trubice,

kde se dokončuje proces mísení do kvazihomogenní směsi. [20] Celý tento proces je znázorněn na obrázku 4.



Obrázek 4 Schéma generace kapalinového abrazivního paprsku [20]

Při tomto procesu se samozřejmě díky vysoké energii paprsku zpravidla porušují částice abraziva. Nově vzniklá zrna abraziva jsou tak nižší střední frakce velikosti částic, než původní zrna nasátá do směšovací komory. Tento fakt přispívá k ovlivnění optimálního průtoku směsi v usměrňovací trubici, tření směsi o stěny usměrňovací trubice, konvergence jádra paprsku a divergence paprsku. Jakmile paprsek opustí usměrňovací trubicí, okolí brzdí paprsek a ovlivňuje jeho profil. Divergence paprsku se zvětšuje a konvergentní jádro postupně mizí. Jádro paprsku má největší rychlost v příčném řezu zhruba konstantní. Rychlostní profil vnější části paprsku odpovídá křivce Gaussovského poklesu. [20]

Pro výpočet účinku abrazivního kapalinového paprsku je nutné předně určit rozpad abraziva ve směšovací komoře. Poté je možné vypočítat urychlování částic v usměrňovací trubicí a hloubku řezu abrazivním paprskem. Zjednodušení tohoto modelu je dosaženo tím, že určíme ekvivalentní parametry čistého kapalinového paprsku z původních parametrů abrazivního paprsku. Mezi tyto parametry patří velikost částic, průtok kapaliny a abraziva, výsledná rychlost abrazivního paprsku

apod. V modelu interakce abrazivního paprsku jsou poté použity modifikované vztahy (13 a 14). Při vstupu abraziva do směšovací komory je rychlost abrazivních částic velmi malá a složka rychlosti rovnoběžná s rychlostí paprsku se většinou blíží nule. To souvisí s úhlem náklonu vstupu abraziva. Vysokoenergetický vodní paprsek proto abrazivo po impaktu rozbije. Rychlost na výstupu z usměrňovací trubice lze určit z průtoku kapaliny pomocí zákona zachování hybnosti při smíšení abraziva s kapalinou, hmotnost vzduchu zanedbáváme. [20]

$$v_a = \delta_e v_0 \frac{m_w}{m_w + m_a} \quad (15)$$

U rovnic pro abrazivní paprsek je třeba počítat se změnou hustoty kapaliny a impaktního tlaku kapaliny vyvolanou abrazivem. Zvýšením průtoku abraziva se zvýší také výkon paprsku, ale jen do zahlcení systému abrazivem. Po úpravách a započítání transformačních součinitelů výsledná rovnice pro hloubku úběru materiálu má tvar [14] [20]:

$$H = \frac{c_5 S_P \pi d_0 \sqrt{2 \rho_j p_j^3 e^{-5\xi_j L} (1-\alpha^2)}}{4 (1+\alpha^{-0.5})(v_P+a_n)^{1.5} (p_j \rho_M \alpha^2 e^{-2\xi_j L} + \sigma \rho_j)} \quad (16)$$

1.2.5 Vliv struktury materiálů na interakční procesy

- Kovy

Porušování kovů čistým vodním paprskem je až na výjimky neefektivní. Kovy jsou pevné, pružné a zároveň plastické materiály, proto čistý paprsek naruší jen slabou povrchovou vrstvu materiálu. Čistý vodní paprsek kovy s vyšší pevností, jako je například ocel nebo titan, neporuší téměř vůbec. Hlavní mechanismus porušení kovů čistým kapalinovým paprskem je eroze. Dopad rychle se pohybujícího paprsku, nebo kapky stlačitelné kapaliny vyvolá tlakový impuls v kovovém materiálu a to způsobí jeho erozi. Při střetu čistého paprsku s kovovým materiálem se jedná tedy o deformační úběr materiálu. Při větší vzdálenosti trysky od obrobku, kdy se paprsek rozpadá na kapky, dochází k erozi lépe, protože kapky působí cyklicky impaktním tlakem, který má při porušování větší účinnost. Další mechanismus porušení, který se může projevit při impaktu paprsku s povrchem kovu je kavitace. Celkově lze však říct, že krystalová mříž kovů má dostatečně pevné vazby mezi mřížkovými atomy, takže energie paprsku se přenesla materiálem ve formě akustických vln, nebo se spotřebuje ve formě velmi malého vnitřního napětí, tepla apod. Materiál tak díky vnitřní stavbě není čistým paprskem příliš porušovaný. [20]

- Amorfni látky

Amorfni látky, jako je například sklo, nemají krystalovou mříž ani předem známé poruchy materiálu, které se vyskytují u krystalických látek. Vyznačují se pevností, nízkou pružností a mohou obsahovat vnitřní pnutí. Nejsou schopné absorbovat tolik energie jako kovy, aniž by se porušily. Porušování je řízeno jejich vnitřním pnutím a nehomogenitami. Při porušování amorfni látek čistým paprskem dochází k lámání, tříštění a odštěpování kousků z povrchu. [20]

- Látky s makroskopicky výraznou krystalickou strukturou

K porušování krystalů, nebo látek s velkými krystaly čistým kapalinovým paprskem dochází podél hranic zrn, nebo poruch krystalů. Zvýšení účinnosti porušení lze dosáhnout vhodným směrem toku vůči orientaci zrn. Snížením tlaku před tryskou docílíme snížení plošné hustoty energie ve stopě paprsku, čímž zefektivníme porušování materiálu, protože paprsek bude mít menší průřez a lépe působí na poruchy, které se šíří podél krystalografických ploch. Tlak nutný k porušování krystalu je přibližně roven dvojnásobku až trojnásobku napětí pro smykové porušení. U vrstveného materiálu může tento tlak klesnout až na dvojnásobek tahového napětí mezi jednotlivými vrstvami materiálu. [20]

U porušování materiálů abrazivním paprskem je využito kapalinového paprsku jako média, které unáší abrazivo. Abrazivo je potom složka paprsku, která erozí porušuje materiál. Částice abraziva dopadne na povrch materiálu, kde díky procesu eroze dochází k úběru materiálu. Kinetická energie této částice se zčásti spotřebuje na porušení vazeb materiálu, část se předává do okolí formou akustických kmitů, část energie se přemění v teplo apod. Při špatně nastavených parametrech, kdy nedochází k prořezání materiálu, se spotřebuje méně energie k porušení vazeb a tím více se energie šíří materiálem v podobě akustických emisí. Tyto emise se mohou měřit pomocí akcelerometrů ve frekvenční oblasti vibrací, nebo akustických emisí.

2 Vibrodiagnostika

Pro monitoring vodního abrazivního paprsku lze využít vibrodiagnostiku. Touto problematikou jsem se již mimo jiné zabýval při měření vibrací na řezné hlavici ve své bakalářské práci. Zde jsem dospěl k závěru, že pro účely monitorování porušování materiálu je přínosnější provádět měření vibrací přímo na obrobku, protože tak mohou vibrace lépe sledovat procesy, které se dějí při impaktu paprsku s obrobkem. Vibrodiagnostikou můžeme monitorovat stav měřeného tělesa a informace nesené signálem slouží k analýze dějů, které v tělese během měření probíhají.

Vibrace jsou mechanické kmitání hmotného bodu, kdy je tento bod vázán na určitou stálou rovnovážnou polohu. Vibracemi také můžeme rozumět odezvu hmoty na působící sílu. Při zanedbání útlumu můžeme definovat úhlovou frekvenci vibrací [23]:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (17)$$

To znamená, že buzení hmotného bodu silou vychýlí pružně uložený hmotný bod o hmotnosti m a tuhosti k z rovnovážné polohy úhlovou frekvencí ω a vyvolá jeho následné kmitání.

V technické praxi se častěji pracuje s frekvencí, která definuje počet kmitů v čase. [23]

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \quad (18)$$

2.1 Dělení vibrací dle typu buzení

Budící síla může mít tři základní podoby [23]:

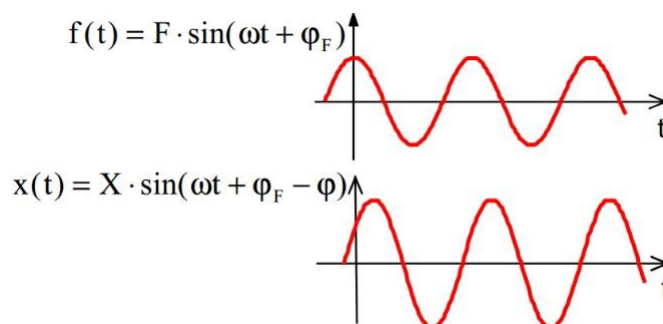
- periodická budící síla
- impulsní budící síla
- náhodná budící síla

2.1.1 Periodicky buzené kmitání

Harmonická síla je elementárním případem periodické síly. V technické praxi je možné většinu sil vyjádřit jako součet harmonických sil. Díky tomu lze popsat vlastnosti periodické síly a její vliv na vibrační odezvu pomocí harmonické síly a odezvy. [23]

Jestliže harmonická síla působí na pružně uložené těleso, je i pohyb tělesa po ustálení harmonický se stejnou úhlovou frekvencí, avšak obecně s odlišnou amplitudou. Takovéto kmitání se nazývá nucené kmitání, viz obrázek 5. Nucené kmitání lze vyjádřit rovnicí [23]:

$$x(t) = X_0 \cdot \sin(\omega t + \varphi_F - \varphi) \quad (19)$$



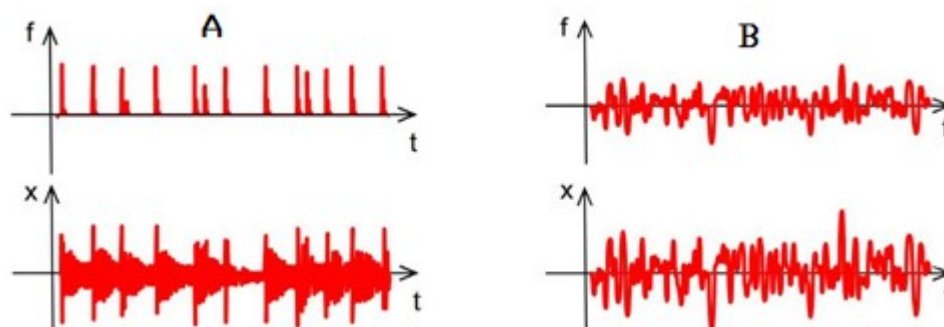
Obrázek 5 Vynucené kmitání harmonickou budící silou [23]

2.1.2 Impulsně buzené kmitání

Jestliže impulsní síla způsobí vychýlení tělesa z rovnovážné polohy, pak těleso volně kmitá na jedné nebo více vlastních frekvencích, viz obrázek 6A. Impulsní kmitání se nazývá také jinak rázové kmitání a využívá se při modální zkoušce. [23]

2.1.3 Kmitání buzené silou náhodného průběhu

Působením síly náhodného průběhu na těleso vzniká kmitání náhodného charakteru a současně se budí i vlastní frekvence tělesa podobně jako u impulsního buzení, viz obrázek 6B. Náhodné buzení se objevuje vždy, ale většinou je na něj nahlíženo jako na šum. Ve vibrodiagnostice je třeba s touto složkou počítat. [23]



Obrázek 6 Vynucené kmitání budící silou A) impulsního a B) náhodného průběhu [23]

2.2 Akcelerometry

Jsou to zařízení, která přeměňují zrychlení na elektrický signál. To nám umožňuje detekovat pohyb – vibrace. Pomocí akcelerometrů můžeme také nepřímo měřit odstředivé a setrvačné síly. [24]

Rozlišují se dva elementární druhy zrychlení:

- Statické zrychlení – gravitace

- Dynamické zrychlení – měří se při pohybu tělesa

Detekce vibrací patří právě mezi měření dynamického zrychlení. Statické zrychlení je ze své podstaty přítomné při měření vždy, je tedy potřeba při měření dynamického zrychlení tuto část ze signálu odfiltrovat. [24]

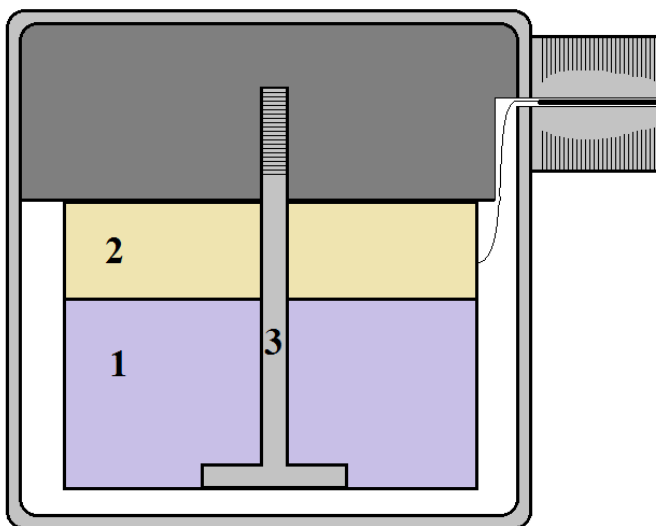
Podle principu měření dělíme akcelerometry na tři typy [24]:

- Akcelerometry s proměnnou kapacitou (VC) – princip spočívá ve změně kapacity kondenzátoru odpovídající měřenému zrychlení
- Piezoelektrické akcelerometry (PE) – zrychlení se měří pomocí piezoelektrického materiálu, viz další kapitola
- Piezorezistivní akcelerometry (PR) – zrychlení se měří pomocí piezorezistivního materiálu, kde zrychlení vyvolává změnu odporu

2.2.1 Piezoelektrický akcelerometr

Jak jsem již zmiňoval, aktivní člen u tohoto typu akcelerometru je z piezoelektrického materiálu. Piezoelektrický materiál je ve tvaru kotouče, na jehož podstavách jsou připevněné elektrody. Výhodou těchto akcelerometrů je, že je není třeba napájet.

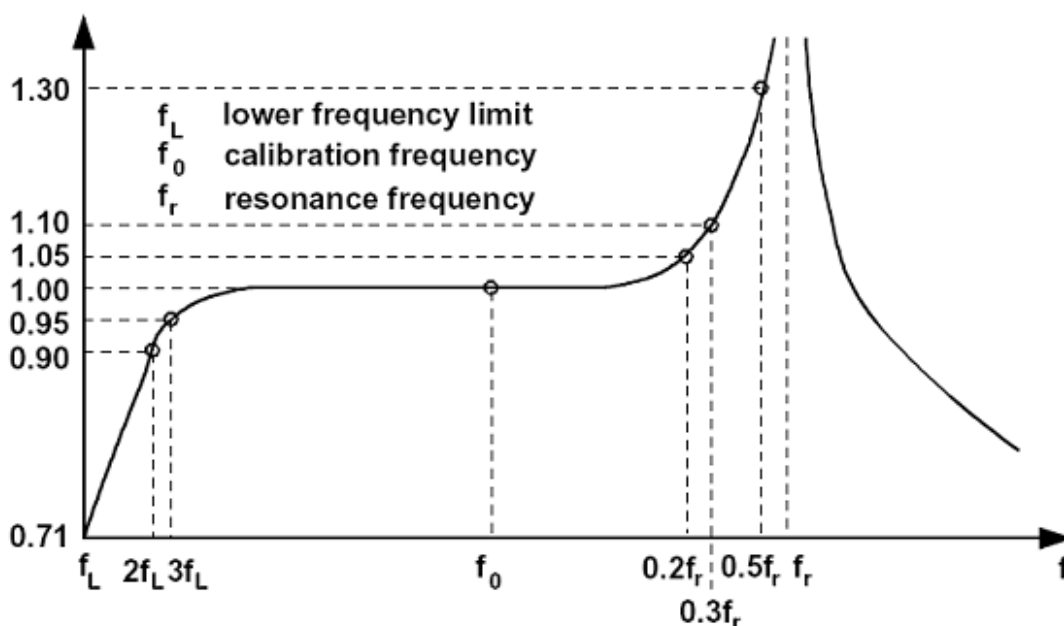
Popis piezoelektrického akcelerometru je na obrázku 7. Piezoelektrický materiál (2) je připojený k pevnému tělu akcelerometru. Seizmická hmota (1) je připojena na druhé straně piezoelektrického materiálu (2). Tenhle sendvič může být ještě spojen předpínacím šroubem (3). Když na akcelerometr působí vibrace, působí seizmická hmota na piezoelektrický materiál silou. Podle Newtonova zákona síly je tato síla součinem hmotnosti seizmické hmoty a jejího zrychlení. Deformací piezoelektrického materiálu vzniká na elektrodách rozdíl potenciálů. Výstupní náboj na elektrodách připevněných na piezoelektrický materiál je úměrný vnější síle/zrychlení.



Obrázek 7 Schéma piezoelektrického akcelerometru

Velikost zrychlení obou částí senzoru je v širokém rozsahu frekvencí stejná. Proto akcelerometr snímá zrychlení měřeného objektu. Výstupem je dvoupólový konektor, který je připojen k elektrodám piezoelektrického materiálu. Aby na výstupu nebyl vysoký náboj, mají některé akcelerometry v sobě zabudovanou elektroniku, která tento náboj mění na nízké napětí. [25]

V rámci efektivního operačního frekvenčního rozsahu není citlivost závislá na frekvenci. Piezoelektrický akcelerometr můžeme považovat za mechanickou dolní propust. Horní frekvenční mez definuje seismická hmota vlastní frekvencí. Aby bylo možné zvýšit rezonanční frekvenci, a tím rozšířit operační frekvenční rozsah, redukuje se obvykle právě seismická hmota. Snížením seismické hmoty však snížíme citlivost akcelerometru. [25]



Obrázek 8 Křivka frekvenční odezvy [25]

Na obrázku 8 je křivka frekvenční odezvy akcelerometru buzeného konstantním zrychlením. Z tohoto grafu můžeme přečíst několik efektivních frekvenčních rozsahů [25]:

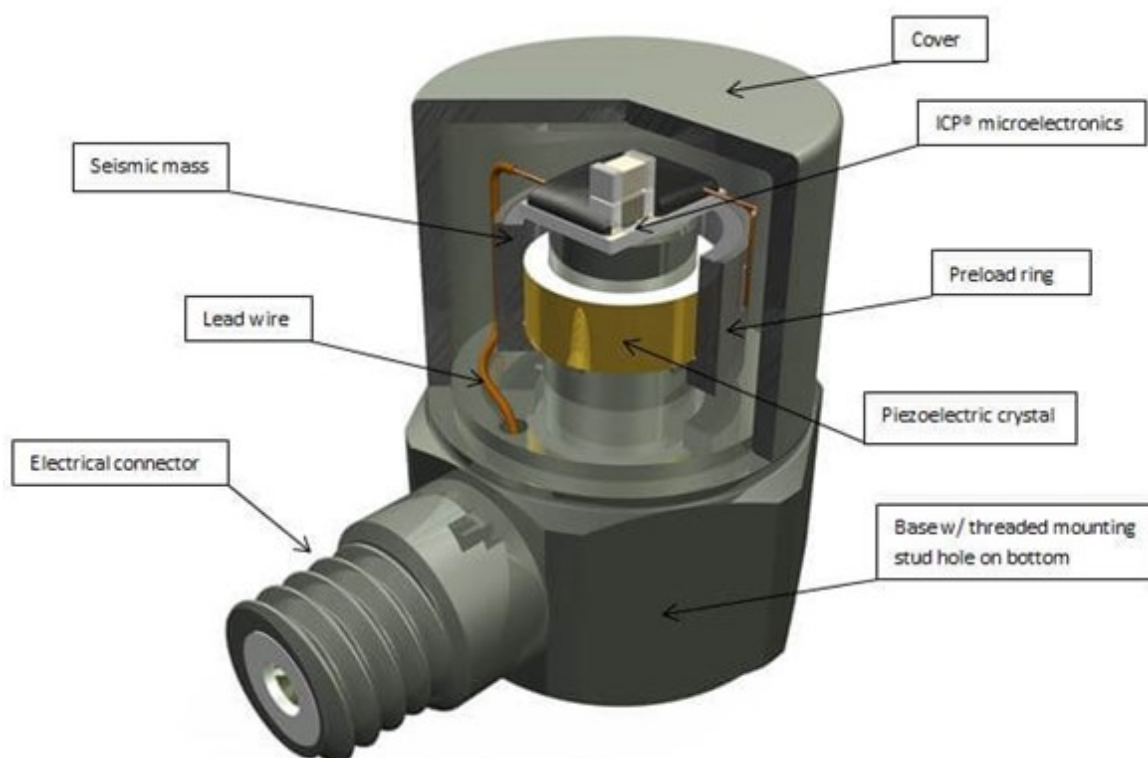
- Přibližně 1/5 rezonanční frekvence odezvy snímače je 1,05 relativní amplitudy. Měřená chyba ve srovnání s nižšími četnostmi je 5%
- Chyba 0,3 rezonanční frekvence je 10%. Proto by měl být lineární frekvenční rozsah omezený na rezonanční frekvenci
- Mez 3 dB s 30% chybou je v přibližně jedné polovině rezonanční frekvence

2.2.2 Akcelerometr PCB model 352C33

Akcelerometr, viz obrázek 9, kterým měříme vibrace, je význačný svou vysokou citlivostí, využívá keramickou technologii ICP® a integrovaný zesilovač. [26] Technické údaje daného akcelerometru jsou uvedeny v tabulce 1.

Tabulka 1 Technické údaje [26]

Citlivost ($\pm 10\%$)	100 mV/g
Měřicí rozsah	± 50 g pk
Frekvenční rozsah ($\pm 5\%$)	0.5 to 10000 Hz
Frekvenční rozsah ($\pm 10\%$)	0.3 to 15000 Hz
Rezonanční frekvence	≥ 50 kHz
Nelinearita	$\leq 1\%$
Příčná citlivost	$\leq 5\%$
Příčná citlivost	$\leq 5\%$



Obrázek 9 PCB akcelrometr ICP® [27]

2.3 Signál

Signál je veličina, která obsahuje informaci, u akcelrometrů je touto veličinou napětí, které nese informaci o zrychlení. Analogový signál, který je spojitý, je potřeba převést na diskrétní. Toho se docílí vzorkováním spojitého signálu. Vzorkování se provádí vzorkovacím obvodem a poté se vzorkované hodnoty převádí A/D převodníkem na čísla. Vzorkovací krok je vzdálenost mezi jednotlivými vzorky a jeho převrácená hodnota je potom vzorkovací frekvence. Pro vzorkovací frekvenci platí takzvaný Nyquistův–Shannonův vzorkovací teorém: Spojitý signál je možné rekonstruován z jeho diskrétních vzorků pouze tehdy, pokud je vzorkovací frekvence alespoň dvojnásobná oproti maximální frekvenci ve vstupním signálu. [28]

3 Shrnutí literární rešerše

Z hlediska posouzení možností metodiky a návrhu experimentů bylo potřeba nastudovat odbornou literaturu, která by mohla k danému tématu práce přinést stěžejní informace. Současné výzkumy se monitoringem abrazivního vodního paprsku zabývají už nejméně 20 let. Během této dlouhé doby vykryštalizovaly určité rysy experimentů a nasbírala se řada zkušeností mnohých autorů, což bylo možno plně využít pro návrh experimentu a analýzy dat. Proto jsem nastudoval doporučenou literaturu a vyhledal další zajímavé články, které mi pomohly během experimentu soustředit se na důležité součásti tohoto tématu a vyvarovat se případných chyb a slepých uliček. Také se mi díky znalosti problematiky zahraničních experimentátorů snad podařilo vnést do tématu něco nového a zoptimalizovat tak myšlenku monitoringu abrazivního vodního paprsku do praktické zkušenosti v laboratoři kapalinového paprsku Katedry fyziky VŠB.

3.1 Senzory při obrábění

[29] Pokročilé sledování obráběcích operací (Advanced monitoring of machining operations).

Autoři: Teti, K. Jemielniak, G. O'Donnell, D. Dornfeld

CIRP (Mezinárodní akademie pro výrobní inženýrství) se dlouhodobě zabývá výzkumem a implementací senzorů při sledování obráběcích operací včetně monitorování stavu nástrojů, bezobslužného obrábění, řízení procesů apod. Tento článek shrnuje dosavadní přínosy CIRP v těchto oblastech a poskytuje aktuální komplexní přehled o senzorech, zpracování signálů a strategii při rozhodování o monitorování procesů. V článku najdeme různé moderní možnosti měření a zpracování signálů.

Několik nejdůležitějších bodů z tohoto článku:

Autoři se zmiňují, že přímé měření síly pomocí piezoelektrických senzorů je možné, pokud je snímač síly namontován v souladu s dráhou síly.

Dále popisují vlnkovou (waveletovou) transformaci (WT). Autoři poznamenávají, že WT je lepší pro silové signály, zatímco rychlá Fourierova transformace (FFT) vypadá lépe u vibračních signálů.

WT existuje více typů: diskrétní vlnková transformace (DWT) rozkládá signál na škálovací koeficienty (aproximace A) a vlnkové koeficienty (details D) pomocí konvoluce signálu a impulsní odezvy dolnoprůchodových a hornoprůchodových filtrů. Dalším typem je vlnková paketová transformace (WPT), kde jsou rozloženy jak aproximace, tak details, což generuje mnohem více frekvenčních pásem.

Článek přináší ucelený pohled na monitorování obrábění a popisuje metody, které se používají při zpracování signálů. Pro monitoring řezů pomocí vodního abrazivního paprsku je potřeba prostudovat konvenční technologie a jejich monitoring pomocí senzorů. Tento článek je vhodný pro porozumění základů sledování obráběcích procesů.

3.2 Měření akustických a vibračních signálů

[1] Monitorování abrazivního vodního paprsku pomocí akustických a vibračních signálů (Abrasive waterjet process monitoring through acoustic and vibration signals)

Autoři: R Pahuja, M Ramulu

Autoři se zaměřují na sledování kvality procesu řezu AWJ prostřednictvím akustických emisí a vibrací při obrábění CFRP (Carbon-fiber-reinforced polymer), titanu a „sendviče“ Ti-CFRP. V článku se zabývají analýzou časových a frekvenčních spekter akustických emisí a vibračních signálů. Jejich cílem je nalézt korelaci mezi signály a parametry procesu. Rychlost odstraňování materiálu dali do závislosti s parametry paprsku a energií akustické vlny. Současně navrhli empirický model pro predikci obrobené plochy průřezu.

Pro pokus použili stroj Flow International Model WJP 1313 s 400 MPa čerpadlem, abrazivo granát mesh 80, úhel dopadu 90°, vzdálenost ústí usměrňovací trubice od obrobku 2,8 mm, usměrňovací trubici délky 101,6 mm a o vnitřním průměru 0,89 mm, vodní rubínovou trysku o průměru 0,33 mm.

V experimentech autoři použili materiál CFRP velikosti (158,75 x 76,2 - 12,7) mm, plechy ze slitiny titanu (Ti6Al4V) měly rozměr (158,75 x 76,2 - 2,794) mm. Na řezané vzorky připevnili akcelerometry, akustické senzory a snímač zatížení. Obrobek položili na dva snímače zatížení namontované na speciálním přípravku. Na obrobek umístili diagonálně dva akcelerometry (pomocí čepů) a dva akustické senzory (pomocí spojovacího gelu Sonotec Ultragel II). Akcelerometry použili vysokofrekvenční Wilcoxon Model 732A s citlivostí 10 mV/g, s amplitudou 500g. Data z akcelerometrů zesilovali pomocí P704B (9V) a takovýto signál zaznamenali pomocí systému National Instruments Data Acquisition. Signály AE měřili pomocí systému PCI-2 AE se softwarem AEWIn a dále zpracovali pomocí softwaru WIN-POST. Citlivost senzorů je 56 dB s provozním frekvenčním rozsahem 125–1 000 kHz. Při experimentu použili tři úrovně tlaku - 200, 275, 300 MPa a rychlost posuvu se pohybovala mezi 10,6–127 mm·s⁻¹ pro titan, 21,2–127 mm·s⁻¹ pro CFRP a 4,3–31,75 mm·s⁻¹ pro „sendvič“ Ti / CFRP.

Získané signály zpracovávali časovou a časově-frekvenční analýzou. Autoři v předběžné studii odhalili přímou souvislost mezi rychlostí pojezdu a výkonovou spektrální hustotou. Výrazné dominantní frekvence pozorovali při vyšších rychlostech pojezdu a vyšším tlaku. Také doporučují použít více než jednoho senzoru ke zvýšení spolehlivosti dat a odstranění jakékoli směrové závislosti. V článku dospěli k závěru, že jak akustické signály, tak signály z akcelerometrů mohou být nositeli informací o procesu řezání, avšak při vysokých pojezdových rychlostech jsou informace získané z akcelerometrů méně spolehlivé kvůli nadměrným vibracím.

Účinek tlaku shledali významnějším u akustické emise, avšak vzhledem k vysoké citlivosti a směrové závislosti akustických vln pozorovali úroveň emisí u obou akustických senzorů rozdílně. Dominantní frekvence byly rozptýleny v tažném titanu, zatímco u CFRP byly pozorovány odlišné frekvence. U „sendviče“ bylo pozorováno smíšené frekvenční chování, které bylo podobnější chování u CFRP materiálu při nízkých tlacích a chování u titanu při vysokých tlacích. Kromě frekvenční analýzy autoři vypočetli RMS signálu v časové doméně a vyvinuli empirický model

pro korelaci akustické energie s energií paprsku a průřezovou oblastí frézovanou AWJ (lze tak předpovídat nedořez, prořez a jiné geometrické charakteristiky obrobené plochy).

Podle zákona zachování energie je rychlost změny energie paprsku úměrná rychlosti odstranění objemu. Tato závislost je znázorněna ve vztahu (20).

$$\frac{dE_{awj}}{dt} \propto \frac{dV}{dt} \quad (20)$$

$$P_{awj} \propto Au \quad (21)$$

Autoři předpokládali mocninou závislost a vyjádřili vyfrézovaný průřez jako:

$$A = \vartheta \left(\frac{P_{awj}}{u} \right)^\tau \quad (22)$$

Očekávání autorů, že RMS energie pozorovaného akustického signálu může souviset s procesními proměnnými, jde vidět v rovnicích (23) a (24).

Předpokládají, že mezi oběma veličinami je vztah:

$$AE_{rms} = f(P_{awj}, u) \quad (23)$$

$$AE_{rms} = \varepsilon (P_{awj} \cdot u)^\Delta \quad (24)$$

Pomocí rovnic (23), (24) a (25) lze potom vyfrézovaný průřez drážky určit podle rovnice (25).

$$A = \vartheta \left(P_{awj}^2 \left(\frac{AE_{rms}}{\varepsilon} \right)^{-\left(\frac{1}{\Delta}\right)} \right)^\tau \quad (25)$$

Tento článek je zajímavý rozhodně z hlediska zpracování signálu, jelikož autoři použili jak RMS signálu, tak také výkonovou spektrální hustotu. Důležitým prvkem v tomto článku je i fakt, že autoři použili na měření akcelerometry, stejně jako já při experimentech v této práci. Pro budoucí výzkum, který by přinesl teoretický popis založený na měření vibrací na obrobku, jsou přínosné výše zmíněné vztahy uvedené v tomto článku.

3.3 Měření akustických emisí u čistého vodního paprsku

[30] Frekvenční analýza vícezdrojových akustických emisí z vrtání horniny vysokorychlostním vodním paprskem a ukazatel účinnosti vrtání (Frequency analysis of multi-sources acoustic emission from high-velocity waterjet rock drilling and its indicator to drilling efficiency).

Autoři: Mao Sheng, Shouceng Tiana, Bo Zhangc, Hongkui Gea

Autoři tímto článkem přinášejí řízené experimentální schéma a frekvenční analýzu pro identifikaci různých zdrojů signálu od srážek paprsku a porušení/vrtání hornin. Akustické signály rozložili na signály s nízkým, středním a vysokofrekvenčním spektrem. Použili metodu variačního rozkladu signálu (VMD) na několik vlastních modálních funkcí (IMF). Odpovídající zdroj signálu byl interpretován porovnáním změn dominantní frekvence před a po porušení horniny. Kromě toho autoři korelovali parametry vrtání a vysokofrekvenční signály různých zdrojů. Autoři použili tříosý stroj KMT®, vysokotlaké čerpadlo KMT streamline SL-V-50 s maximálním tlakem 380 MPa. trysku použili o průměru 0,76 mm, vzdálenost trysky od obrobku nastavili na 2 mm, tlak použili vysoký od 210 po 230 MPa a nízký od 50 – 60 MPa, průtok 60 mL/s.

Pro záznam signálů použili digitální AE systém PAC® s vysokou vzorkovací frekvencí 3 MHz a 40 dB předzesílení. Kvůli cirkulaci paprsku byly řezná hlavice a horninový terč ponořeny do vodní nádrže. Signál zachycovali jedním podvodním AE senzorem PAC® R30I-UC s širokopásmovým připojením 200–400 kHz a rezonanční frekvencí: 350 kHz. AE senzor namontovali na povrch obrobku. Jako materiál na vrtání použili břidlici Longmaxi, pískovec Junggar a vápenec Wumishan. K upevnění kontaktů AE senzorů s povrchem vzorku byl použit gumový pás.

Autoři poznamenávají, že naměřený signál procesu vrtání hornin vodním paprskem obsahuje informace o porušení hornin, ale také o turbulentním toku vysokorychlostního vodního paprsku a jeho nárazech na horninu. Proto provedli kontrolní měření na oceli AISI 1045 s tlakem 50-60 MPa, protože zde nedojde k porušení materiálů, ale zaznamenali tak proces nárazu. S vyšším tlakem potom měřili samotný signál při porušování hornin. Autoři zjistili, že náraz vodním paprskem generuje širokopásmový akustický signál. Frekvenční schéma vysokofrekvenčních signálů vykazovalo značnou rozmanitost mezi čtyřmi materiály díky jejich rozdílnému akustickému útlumu. Avšak změna tlaku vodního paprsku schéma nemění. Při vrtání hornin vodním paprskem autoři pozorovali snížení vysokofrekvenčních signálů. Hlavní frekvence vysokofrekvenčních signálů může být podle autorů časově závislá kvůli procesu porušení hornin - vysokofrekvenční pásma vykazovalo dobrou korelaci s hloubkou vrtu.

Tento článek je přínosný díky analýze signálů, kterou autoři provedli. Zajímavý je rozklad signálu, kdy jednodušší signál by byl lépe zpracovatelný. Tahle metoda by umožnila zpracovat ze signálu jen tu část, která nese důležitou informaci o procesu řezu. Výsledky však mohou být odlišné díky rozdílnému mechanismu interakce čistého vodního paprsku s obrobkem a abrazivního vodního paprsku s obrobkem. Protože autoři využili vysokorychlostní čistý vodní paprsek a měřili akustické emise, nelze výsledky zcela porovnávat.

3.4 Akustické emise při vrtání těžkoobrobitelných materiálů

[31] Snímání akustické emise jako nástroje pro pochopení mechanismů vrtání abrazivním vodním paprskem těžko zpracovatelných materiálů (Acoustic emission sensing as a tool for understanding the mechanisms of abrasive water jet drilling of difficult-to-machine materials).

Autoři: R Kovacevic, H-S Kwak, R S Mohan

V článku se autoři zabývají vrtáním stacionárního obrobku pomocí stacionárního vodního paprsku. Autoři definují kritické parametry procesu vrtání, které ovlivňují proces vrtu: vzdálenost usměrňovací trubice od obrobku, tlak čerpadla, abrazivní průtok, abrazivo, zpětný tok vody, úhel dopadu paprsku a dobu vrtání. Řízení geometrie otvoru a kvality díry lze podle autorů dosáhnout změnou vzdálenosti, abrazivního průtoku, samotného abraziva a velikosti abraziva, zatímco hloubku vrtání lze řídit změnou tlaku, úhlem dopadu paprsku a doby vrtání. Kromě těchto parametrů je podle autorů výkon vrtání z hlediska rychlosti odvádění materiálu, nebo rychlosti průniku ovlivňován vlastnostmi materiálu a zpětným tokem proudu z dna díry - zpětný tok totiž způsobuje turbulenci uvnitř vyvrtané díry, snižuje tak rychlost částic a narušuje proces vrtu. Autoři k experimentu použili nejmenovaný stroj, abrazivo granát mesh 80, trysku o průměru 0,46 mm, usměrňovací trubici o průměru 1,27 mm a délce 88,9 mm, tlak čerpadla 206 MPa, průtok abraziva 5,79 g/s, vzdálenost usměrňovací trubice od obrobku měli 5 mm. Generované signály AE detekovali a zpracovali systémem pro monitorování akustických emisí AET 5500 (rezonanční frekvence 2 MHz, vzorkovací frekvence 1 MHz). Pro tento experiment autoři použili tři typy nehomogenní žáruvzdorné keramiky o tloušťkách 51 mm, a to chromitan hořčnatý, sintrovaný hořčík a bauxit. Signály autoři monitorovali během tří fází procesu vrtání, impaktu, kdy narazí čistý vodní paprsek na obrobek, fáze vrtání, kdy je obrobek porušován abrazivním vodním paprskem a fáze prodlevy, ke které dochází po úplném průniku cílovým materiálem. Autoři signály analyzovali pomocí rychlé Fourierovy transformace (FFT). Také během analýzy použili stochastické modelování signálů v časové doméně technikou modelování ARMA (to údajně poskytlo vhled do fyziky procesu vrtání AWJ). V jedné části experimentu autoři vyvrtali několik slepých děr různých hloubek a změřili si dobu vrtání. Každou vyvrtanou díru naplnili jemným abrazivem, aby zjistili objem díry, potom stanovili hmotnost odstraněného materiálu. Takto určená hmotnost vydělená časem umožňuje vypočítat rychlost odstraňování materiálu. Autoři zjistili, že rychlost odstraňování materiálu se s dobou vrtání příliš nemění, RMS se snižuje se zvyšováním hloubky vrtání. Tento trend autoři přičítají dvěma příčinám, to znamená nelineární závislosti hloubky vrtání na době vrtání a útlumu signálu AE způsobenému zbytky vodního paprsku v díře malého průměru. Další zjištění autorů je, že amplituda signálu AE je přibližně třikrát až čtyřikrát vyšší ve fázi nárazu čisté vody než během vrtání a frekvenční rozklad pomocí modelu ARMA naznačuje, že primární frekvence signálu AE je způsobena nárazem paprsku a sekundární frekvence je způsobena jeho odrazem.

Autoři zde opět používají zajímavou metodu zpracování signálu, kdy rozkládají signál pomocí modelu ARMA. Tento model se používá u stacionárních signálů. AR model je vlastně lineární regrese, MA je model s klouzavým průměrem. ARMA kombinuje oba modely. [32]

Z hlediska zpracování signálů je zajímavé, že pracují s RMS. Je to jedna z možností, která připadá v úvahu při analyzování signálů.

4 Experimentální část

Měření dat pro zpracování svojí diplomové práce jsem prováděl na dvou pracovištích. Od konce září 2019 po konec listopadu 2019 jsem byl na praktické stáži Erasmus v Politecnico di Milano, kde jsem pracoval v teamu místního kapalinového paprsku. Zde jsem také započal experimenty pro praktický základ své diplomové práce. S prací na experimentech jsem pokračoval v laboratoři kapalinového paprsku na katedře fyziky VŠB, kde jsem člen výzkumné skupiny pana prof. Ing. Hlaváče, Ph.D. už od února 2017.

- technické vybavení sekce kapalinového paprsku Politecnico di Milano:

Intermac Primus 322 a vysokotlaké čerpadlo ECOTRON 40.37; tlak do 400 MPa.

- technické vybavení laboratoře kapalinového paprsku katedry fyziky VŠB Ostrava:

PTV WJ1020-1Z-EKO a vysokotlaké čerpadlo PTV 19/60; tlak do 415 MPa.

4.1 Záznam měření

K zaznamenání signálů z akcelerometrů se v laboratoři kapalinového paprsku katedry fyziky používá sestava od firmy National Instrument. Výhoda v používání komponentů měřicí sestavy od jedné firmy je jejich bezproblémová kompatibilita a v tomto případě také výborná softwarová opora. Záznam měření byl zaznamenán na sestavě složené z pětislotové skříně National Instruments PXIe-1073, viz obrázek 10, modulu pro akvizici dat NI PXIe-4492, karty NI PXI-ExpressCard8360, viz obrázek 11, která slouží k propojení PC s A/D převodníkem. Pro nahrávání dat používám software Signal Express od National Instrument, pro online analýzu signálu a nahrávání používám Labview Sound and Vibration Assistant.



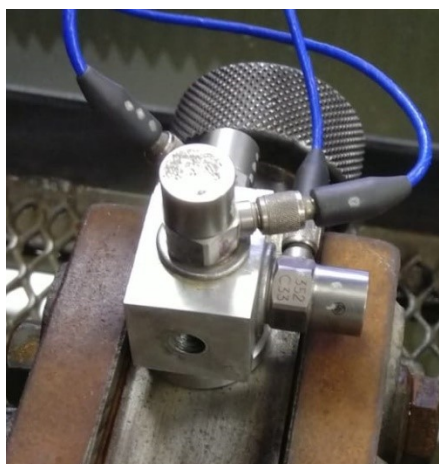
Obrázek 10 NI PXIe-1073



Obrázek 11 Ni ExpressCard8360

4.2 Měření vibrací

Vibrace v laboratoři kapalinového paprsku měříme pomocí tří akcelerometrů PCB 352C33. Pro připojení akcelerometrů k obrobku jsem vyrobil speciální hranolek, kde jsou akcelerometry rozmístěny ve třech k sobě kolmých osách [X, Y, Z]. Tento hranolek jsem navrhl při praktické stáži v Milaně. Pro vyřezání těla jsem použil místní abrazivní vodní paprsek. Studenti mají v laboratoři k dispozici velmi dobře vybavenou dílnu, kde jsou dva malé soustruhy, stojanová vrtačka, pila na řezání kovů a další stroje. Zde jsem tedy přípravek mohl dokončit podle svých představ. Hranolek se připevní pomocí šroubu k obráběnému materiálu. Výhodnost hranolku spočívá v jednoduchosti a rychlosti upevnění tří akcelerometrů na obrobek a možnost zachovat i při nepravidelném tvaru tělesa upevnění akcelerometrů v žádané pozici. Na hranolek byl posléze připevněn i speciální magnet určený k upevňování akcelerometrů. Dodatečná úprava byla zvolena proto, aby se mohly akcelerometry jednodušeji připojit k feromagnetickým materiálům a tím bylo měření flexibilnější. Další z důvodů je, že ne všechny obrobky je možno provrtat tak, aby se hranolek mohl upevnit šroubem. Jeden z příkladů je upevnění přípravku s akcelerometry na koníka speciálního soustruhu, který se používá k soustružení pomocí abrazivního vodního paprsku. Upevnění akcelerometrů pomocí přípravku hranolku s magnetem lze vidět na obrázku 12.



Obrázek 12 Upevnění hranolku pomocí magnetu

Pro upevňování akcelerometrů k obrobku jsem zvolil systém hranolku i z toho důvodu, že takovéto pevné uchycení zajistí nejmenší ovlivnění frekvenční charakteristiky a zajistí maximální využití frekvenčního rozsahu. Zároveň protože měřím vibrace, tedy odezvu silového působení na obrobek, nemá tento systém upevnění takový vliv na signál. Tento hranolek není vhodný pro měření akustických emisí z důvodu přechodu signálů mezi odlišným prostředím. Hranolek je vyrobený z duralového materiálu, protože dural je lehčí než ocel, zároveň je však dostatečně pevný na to, aby vnitřní závity držely pevně a jejich životnost byla dlouhá i při častějším šroubování přípravku k obrobkům. Hranolek má čtvercovou základnu o velikosti 20 mm. Ve středu vrchní základny je díra se závitem M5 pro upevnění akcelerometru. Spodní základna má díru se závitem M6 k upevnění hranolku k obráběnému materiálu taktéž ve středu. Plášť má hranu o délce 25 mm. Na třech stranách pláště jsou ve středu díry M5 pro upevnění dvou akcelerometrů a jednoho magnetu. Hranolek pro upevnění akcelerometrů lze zároveň použít i na speciální rámeček, který je součástí patentovaného přípravku na měření síly používaného v laboratoři kapalinového paprsku viz obrázek 13.



Obrázek 13 Detail hranolku upevněného na rámečku

Výhoda upevnění na rámeček silového měřiče je, že můžeme současně měřit síly, kterými působí abrazivní vodní paprsek na obráběný materiál a vibrace, které při impaktu způsobuje ve třech osách. V měření dat pomocí této soustavy budeme v budoucnu pokračovat na strojích z jiných pracovišť pro získání co nejlepších porovnatelných a čitelných výsledků.

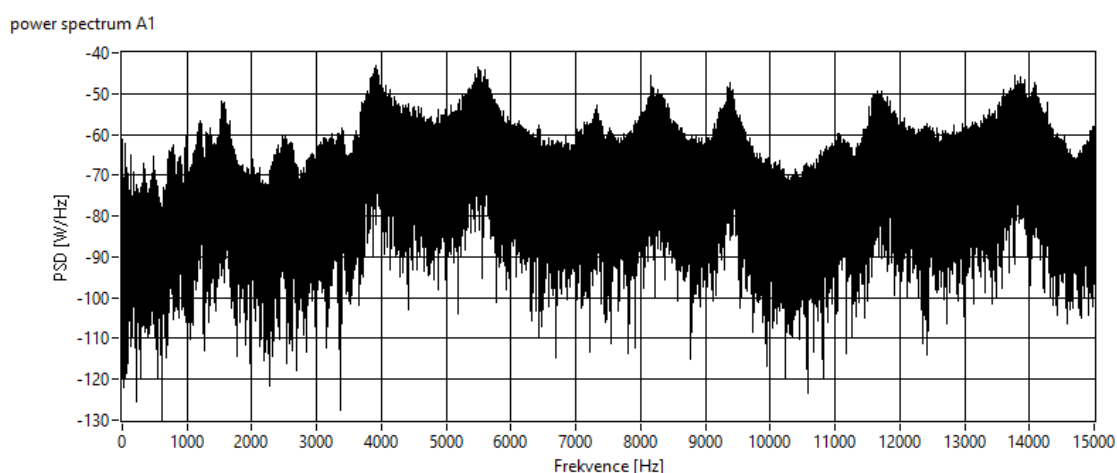
4.3 Zpracování signálu

4.3.1 Spektrální hustota výkonu

Anglicky uváděno jako power spectrum density (PSD), někdy jen power spectrum. Historický název pochází z elektrotechnických základů analýzy signálů. Definuje se jako výkon (tepelný), který by měla určitá frekvenční složka signálu chápaného jako elektrické napětí na jednotkovém rezistoru. Od amplitudového spektra je matematicky odlišné tím, že je definované jako druhá

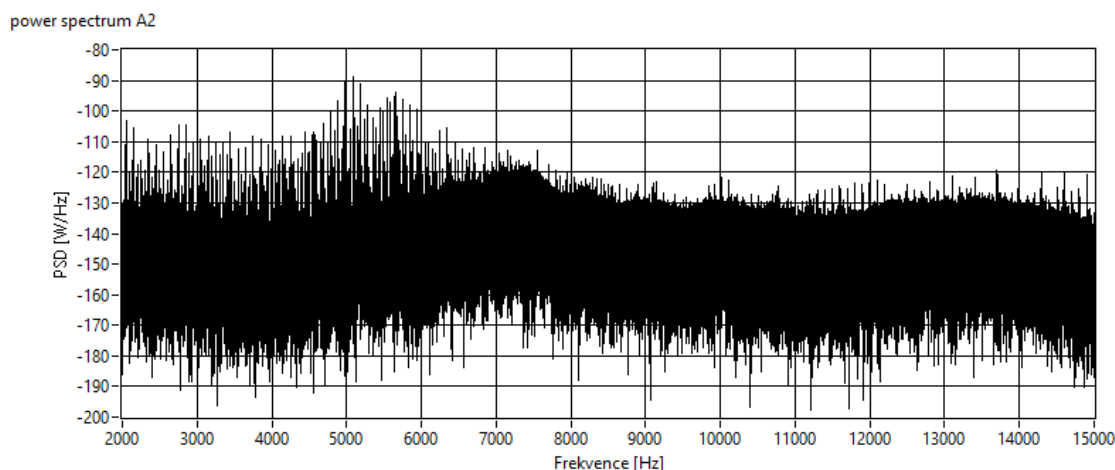
mocnina amplitudového spektra. Výkonové spektrum nám přináší informaci o energetických poměrech ve spektru signálu. [33]

Metoda spektrální výkonové hustoty se často objevuje v článcích odkazujících na monitoring abrazivního vodního paprsku. Použití této metody analýzy signálů se jeví jako logické, protože nám přináší informaci o výkonu jednotlivých frekvencí. Rozbor takového spektra však přináší řadu úskalí. Pro online monitoring je potřeba vytvořit elementární nástroj tak, aby obsluha stroje mohla jednoduše poznat, zda se materiál zcela prořezává. Výsledky analyzování signálů pomocí spektrální hustoty výkonu jsou velmi proměnlivé. V signálech se objevují rušivé elementy okolí, jako je například motor soustruhu nebo motor chladicího větráku. Tato metoda se hodí tedy pro analýzu signálů, kdy jsme schopni zaručit stejné podmínky pro všechny řezy, a výsledná analýza se provádí po ukončení měření. Pro online analýzu při řezech v naší laboratoři není tahle metoda přínosná. Jak se dále zmiňuji, vytvořil jsem program pro analýzu signálu pomocí tohoto parametru spektrální hustoty a několik signálů jsem zpracoval, abych ověřil jeho funkčnost. Zjišťoval jsem, jestli se vizuálně spektra nemění podle nějakých znaků typických pro daný řez. Na obrázku 14 je typické výkonové spektrum hustoty řezu materiálu.



Obrázek 14 Výkonové spektrum

Na následujícím obrázku 15 lze vidět spektrum měřené na koníku soustruhu, kde na 5000 Hz se objevuje dominantní pík, který je původem z větráku motoru. To jsme ověřili porovnáním s otáčkami motoru, testem vibrací při vypnutí stroje AWJ a kontrolou spektra při zapnutí a vypnutí motoru větráku.



Obrázek 15 Výkonové spektrum s viditelnou frekvencí motoru

V dalších krocích se budu při analýze zabývat RMS časového signálu z důvodu jednodušší a přehlednější analýzy, která je velmi výhodná pro online analýzu.

4.3.2 Efektivní hodnota

RMS (root mean square), neboli efektivní hodnota, je definovaná jako:

$$y_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T y^2(t) dt} \quad (26)$$

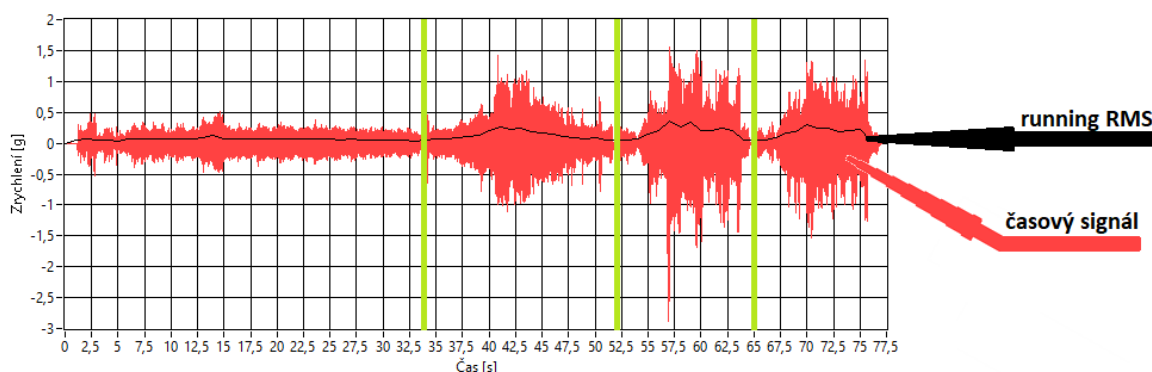
Efektivní hodnota je měřítkem energie přenášené signálem. Může nabývat jen kladných a konečných hodnot. [34]

RMS pro online analýzu se zdá být vhodným nástrojem, protože nese informaci o energetickém obsahu signálu, zároveň je výhodná z důvodu online monitoringu. Running RMS je funkce v LabVIEW, která nám vypočítává hodnotu RMS z každého vzorku, takže nám vznikne křivka. Můžeme potom online sledovat trend křivky a podle toho odvozovat, jak probíhá řez. Vypočtení efektivní hodnoty určité části signálu je důležité pro kvantitativní vyhodnocení signálů a také pro online monitoring řezu.

4.3.3 Software

Jedna z výhod zaznamenávání dat pomocí Signal Express z měřicí soupravy od National Instrument je, že zaznamenané soubory s koncovkou tdms lze výborně analyzovat pomocí LabVIEW. Program a zkušenosti z analyzování dat pomocí LabVIEW jsem měl již z bakalářské práce. Tento původní program jsem použil jako hrubý základ pro vytvoření nových programů. Navrhl jsem dva programy pro analýzu vibrací naměřených na obrobku. První program vyhodnocuje z uživatelem navoleného výřezu časového signálu spektrální hustotu výkonu. Dále program vypočítává maxima z časového signálu. Vykreslí se pro každý akcelerometr zvlášť graf spektrální hustoty, viz obrázek 14 a obrázek 15, a vypíší se vypočtené hodnoty. Druhý program vykreslí pro každý akcelerometr graf časového signálu, kde je také zakreslena křivka běžícího RMS. Uživatel si navolí výřez časového signálu, kde probíhá řez, a program mu vypočte RMS výřezu. Tento druhý program také použiju dále pro svoji analýzu dat, protože považuju

vyhodnocení časových signálů a jejich RMS za výhodné pro online monitorování řezu. V příloze 1 je obrázek, kde je vidět diagram nového programu. Po načtení dat ze souboru s koncovkou tdms proběhne jejich kalibrace. Poté se data rozdělí na každý akcelerometr zvlášť, kdy si uživatel vybírá výseč signálu, kterou chce dále analyzovat. Zde se signál opět rozdělí, jedna část signálu se vykreslí v grafu společně s průběžnou křivkou RMS a z druhé části signálu uživatel vybere výřez signálu, kde program vypočte numerickou hodnotu RMS tohoto výřezu. Na obrázku 16 lze vidět graf, kde zelené čáry oddělují čtyři řezy stejného materiálu s různou postupovou rychlostí. Černá křivka značí běžící RMS signálu, červená křivka je samotný signál.



Obrázek 16 Analýza časové závislosti

4.4 Vyhodnocení měření

V této kapitole vyhodnotím naměřené signály pomocí nového programu 2. Při vyhodnocování v bakalářské práci jsem se potýkal se záležitostí, že na začátku měření se u každého akcelerometru rozhodily signály natolik, že při vyhodnocení to byl zásadní problém. Pro vyhodnocení vrtání tenkého materiálu, kdy byl signál příliš krátký, to byla fatální chyba. Bylo velmi problematické udělat relevantní závěry z takového měření a spoustu signálů nebylo možné vyhodnotit. Jedna z možností, jak tento problém vyřešit, bylo měřit data na jiném stroji, kde by se tato chyba neprojevovala. Avšak pro nás bylo důležité zdroj této chyby identifikovat a případně zjistit, jak takovýto zdroj eliminovat. Ověřili jsme, že zdroj rušivého signálu, který se objevoval na začátku měření vibrací na řezné hlavici, pochází z pneumatického uzavíracího ventilu vysokotlaké vody nad řeznou hlavici. Eliminace tohoto rušivého signálu je prakticky nemožná. Při měření vibrací na obrobku se s tímhle problémem nesetkáváme.

4.4.1 Měření vibrací na stejném druhu materiálu o různých tloušťkách

Experiment probíhal v laboratoři kapalinového paprsku katedry fyziky VŠB. Abrazivo jsem použil standardně používané v laboratoři mesh 80 australský granát, tlak vody byl 380 MPa, průměr trysky 0,25 mm; délka usměrňovací trubice 75 mm a průměr usměrňovací trubice 0,76 mm. Vzdálenost usměrňovací trubice od obrobku byla 2,5 mm. Vzorkovací frekvence byla 30 kHz.

Měřil jsem vibrace na obrobku pomocí hranolku připevněného šroubkem. Řezaný materiál měl rozměry (109 x 168) mm a přípravek s akcelerometry byl připevněn v rohu, viz obrázek 17. Paprsek řezal materiál ve směru X, směr Y je druhý boční akcelerometr, Z je vrchní akcelerometr,

tedy v ose paprsku. Měřil jsem vždycky čtyři řezy o délce 25 mm při různých rychlostech, které jsem navrhl tak, aby se zhoršovala kvalita řezu. Měření se opakovalo na stejném materiálu o různých tloušťkách. Materiál byla konstrukční ocel zpracovaná podle normy ČSN EN 10025-2.



Obrázek 17 Upevnění akcelerometrů na vzorku

Na obrázku 18 lze vidět čtyři řezy, od čísla jedna po číslo čtyři se rychlost řezu zvyšovala. U třetího a čtvrtého řezu můžeme vidět nedořezy, můstky. Kvalita takovýchto řezů je velmi špatná a v praxi by se řez musel projíždět znovu, aby se obrobek dal z materiálu vytáhnout. První řez je hezký a velmi kvalitní, druhý je dobrý, za jistých podmínek se normálně takové kvality při dělení materiálů využívá.



Obrázek 18 Ukázka řezů

Data řezů jsem měřil na stejném materiálu o různých tloušťkách, abych mohl hledat závislost RMS na měnícím se parametru při řezání, což v tomto případě byla rychlost posuvu, a neuvažovat případnou materiálovou závislost. V tabulce 2 vidíme RMS materiálu o pěti tloušťkách materiálu

ve třech směrech, kdy osy souhlasí s osami CNC stolu. Grafy k datům uvedené v tabulce 2 lze najít v příloze 2.

Tabulka 2 RMS jednotlivých řezů Ostrava

tloušťka	x	y	z	v_p
[mm]	RMS	RMS	RMS	[mm/min]
10	0,063765	0,090058	0,06313	50
10	0,123962	0,222298	0,169768	100
10	0,125512	0,2386	0,167805	150
10	0,140289	0,244911	0,184055	165
15	0,068251	0,081516	0,086712	37,5
15	0,144684	0,177507	0,204797	75
15	0,208192	0,257962	0,451108	112,5
15	0,195216	0,294343	0,237677	123,75
20	0,066276	0,112672	0,094817	37,5
20	0,125219	0,230684	0,177159	75
20	0,181439	0,375277	0,269824	112,5
20	0,165931	0,293618	0,204544	123,75
25	0,046918	0,107784	0,057235	25
25	0,06092	0,137836	0,091477	50
25	0,121212	0,258099	0,174038	75
25	0,121463	0,274494	0,158659	82,5
30	0,036423	0,079713	0,044846	20
30	0,045271	0,119909	0,071335	40
30	0,08939	0,209744	0,111748	60
30	0,088969	0,243477	0,132883	66

Data z tabulky 2 jsem rozdělil do tabulky 3 podle kategorií kvality řezu v závislosti na rychlosti posuvu k dané tloušťce materiálu. Nutno podotknout, že názvosloví řezů je mojí vlastní kategorizací a nemusí se tak shodovat se zažitými zvyklostmi, nebo názvoslovím používaným firmami.

Tabulka 3 Rozdělení dat do kategorií

výborná	dobrá	dělicí řez	limitní
0,0901	0,2223	0,2386	0,2449
0,0638	0,1240	0,1255	0,1403
0,0631	0,1698	0,1678	0,1841
0,0815	0,1775	0,2580	0,2943
0,0683	0,1447	0,2082	0,1952
0,0867	0,2048	0,4511	0,2377
0,1127	0,2307	0,3753	0,2936
0,0663	0,1252	0,1814	0,1659

0,0948	0,1772	0,2698	0,2045
0,1078	0,1378	0,2581	0,2745
0,0469	0,0609	0,1212	0,1215
0,0572	0,0915	0,1740	0,1587
0,0797	0,1199	0,2097	0,2435
0,0364	0,0453	0,0894	0,0890
0,0448	0,0713	0,1117	0,1329

Data jsem se rozhodl statisticky zpracovat a otestovat je, abych zjistil, zda RMS závisí na rychlosti posuvu. V tabulce 4 jsou základní statistické veličiny.

Tabulka 4 Výběrové charakteristiky RMS řezů

	Výborná	dobrá	dělicí řez	limitní
Stř. hodnota	0,0705	0,1470	0,1992	0,2065
Medián	0,0673	0,1413	0,1948	0,1999
Směr. odchylka	0,0206	0,0529	0,0774	0,0591
Minimum	0,0364	0,0609	0,0894	0,1215
Maximum	0,1078	0,2307	0,3753	0,2943
Počet	14	14	14	14

Odlehle hodnoty jsem detekoval Grubbsovým testem a označil je v tabulce 3 červenou barvou a dále je při statistickém analyzování nepoužívám.

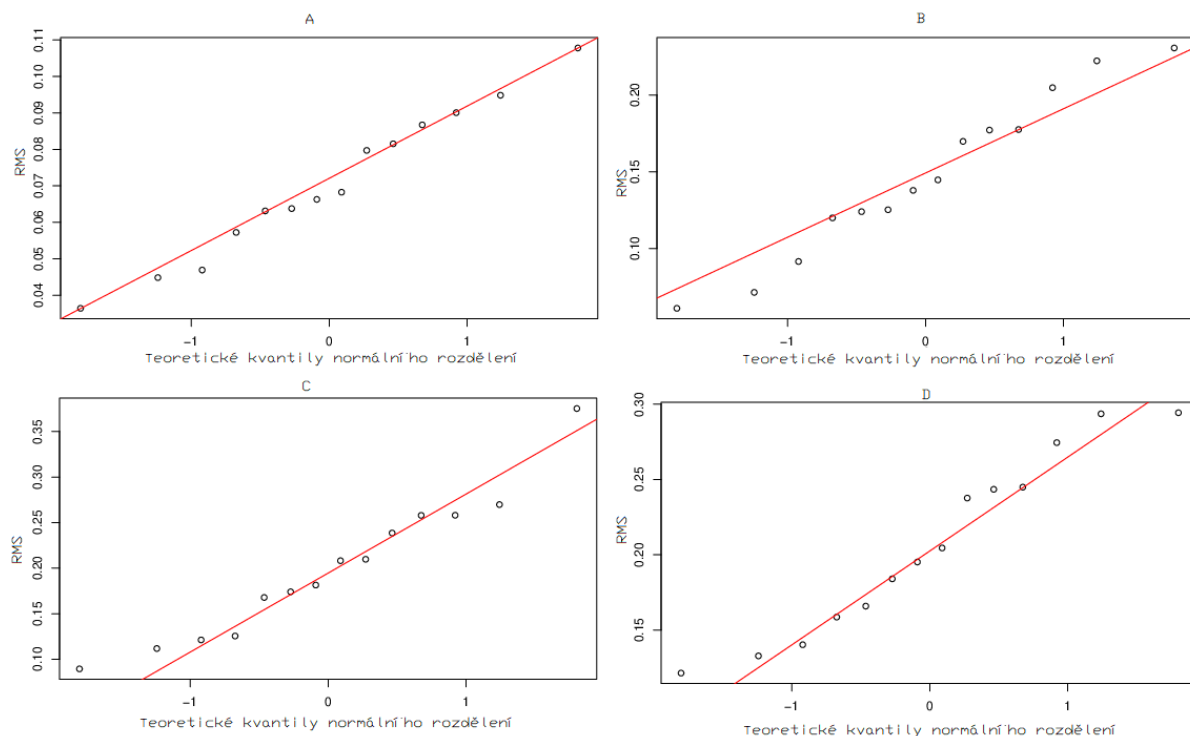
Nejdříve otestujeme každou kategorii na normalitu dat Shapirovým - Wilkovým testem.

H_0 : Data pocházejí z normálního rozdělení

H_A : $\neg H_0$

U všech kategorií je $p_{hodnota} > 0,05$; nezamítáme nulovou hypotézu. Můžeme předpokládat, že data pochází z normálního rozdělení.

Na obrázku 19 vidíme Q-Q grafy jednotlivých skupin. Graf A pro výbornou kvalitu řezu, B pro dobrou, C pro dělicí řez a D pro limitní. Z grafů lze vyčíst, že už od pohledu se zdají data být normálního rozdělení.



Obrázek 19 Q-Q grafy skupin

Rozptyly se liší, normalita nebyla zamítnuta, proto dále přistoupíme k exaktnímu testu homoskedasticity – Bartlettův test.

H_0 : Data pocházejí z populací se stejnými rozptyly

$H_A: \neg H_0$

$p_{hodnota} \ll 0.001$

Na hladině významnosti 0,05 zamítáme předpoklad o shodě rozptylů řezů. Existuje statisticky významný rozdíl mezi rozptyly jednotlivých skupin řezů.

Jsou splněny podmínky pro Kruskal-Wallisův test.

H_0 : Data pocházejí z populací se stejnými mediány

$H_A: \neg H_0$

$p_{hodnota} \ll 0,001$

Na hladině významnosti 0,05 zamítáme H_0 , to znamená, že existuje statisticky významný rozdíl mezi mediány jednotlivých skupin kvality řezů. To znamená, že RMS statisticky významně roste s horší kvalitou řezu, respektive s vyšší rychlostí posuvu materiálu.

Přistoupíme k POST-HOC analýze, respektive k Dunnově metodě.

Dle POST-HOC analýzy, kde výsledkem je tabulka 5, jsou na hladině významnosti 0,05 dvojice (dobrá - dělicí řez), (dobrá - limitní) a (dělicí řez - limitní) homogenní, to znamená, že RMS výborného řezu je nejnižší a není homogenní s ostatními RMS kvality řezu.

Tabulka 5 POST-HOC analýza řezů

	výborná	dobrá	dělicí řez	limitní
výborná	-	-	-	-
dobrá	<<0,001	-	-	-
dělicí řez	<<0,001	0,118	-	-
limitní	<<0,001	0,048	0,677	-

V tabulce 6 vidíme efekty jednotlivých kvalit řezů, podle velikosti efektů řezu rozdělíme.

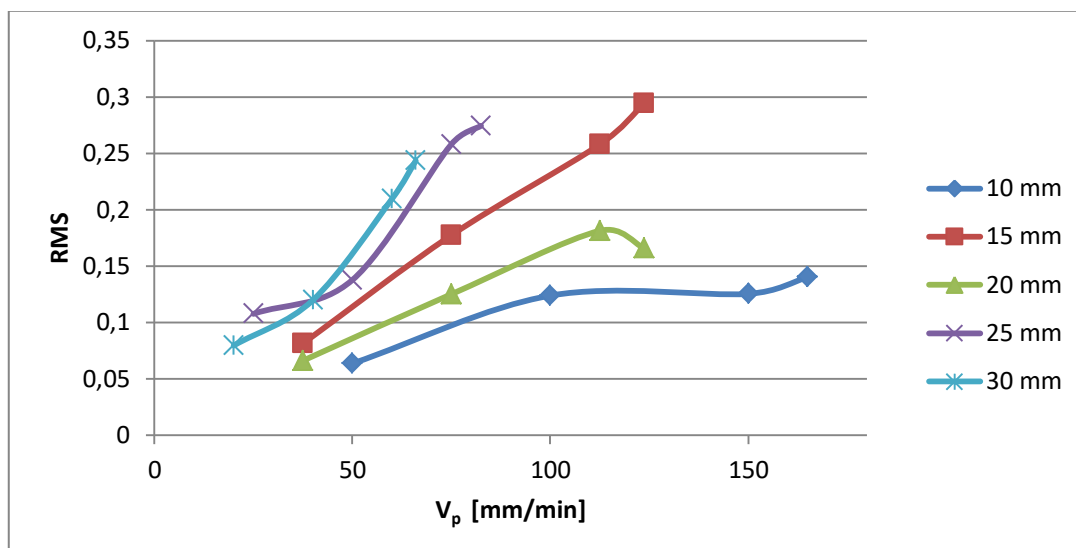
Tabulka 6 Efekt řezů

	výborná	dobrá	dělicí řez	limitní
Efekt	-0,0853	-0,0088	0,0434	0,0507

Pořadí skupin kvality řezů z hlediska velikosti RMS: 1) limitní; 2) dělicí řez; 3) dobrá; 4) výborná.

Můžeme tedy říct, že statisticky významně se RMS mění s rychlostí posuvu a tím i kvalitou řezu. Provedená analýza vede k závěru, že výborná kvalita řezu vykazuje jistou nekonzistenci RMS k ostatním kvalitám řezu. To může být spojené s tím, že při vyšší rychlosti posuvu, než je optimální rychlost pro kvalitní řez, se RMS zvýší výrazně a při vyšších rychlostech trend růstu nemusí být už tak velký. Také se u vysokých rychlostí posuvu, kdy paprsek ztrácí schopnost účinně řezat, mohou projevit částečně drobné nehomogenity v materiálu.

Na obrázku 20 lze vidět graf, kde je závislost RMS na rychlosti posuvu. Každá tloušťka materiálu má svoji křivku. Vidíme, že již z grafu lze vyzorovat trend, kdy RMS stoupá s rychlosti posuvu. U tloušťky 20 mm vidíme, že u nejrychlejšího řezu RMS došlo na konci křivky k poklesu RMS. Tomuto drobnému snížení RMS nepřisuzují velkou váhu, protože se může jednat znovu o nehomogenity v materiálu, nebo jinou podobnou nečekanou událost, která zapříčinila drobné snížení RMS, oproti velmi blízké předchozí hodnotě řezu. Nutno podotknout, že rychlost dělicího řezu je jen o 10% nižší než u kategorie limitní.



Obrázek 20 Závislost RMS na rychlosti posuvu

Následující analýzou chci zjistit, zda měření vibrací na obrobku je závislé na ose, ze které vibrace snímáme. Pro statistiku použiju tabulku 2. Zde jsou akcelerometry X, Y a Z pojmenované podle toho, ve kterém směru osy jsou připevněny. V tabulce 7 jsou základní statistické veličiny.

Tabulka 7 Výběrové charakteristiky RMS akcelerometrů Ostrava

	x	y	z
Stř. hodnota	0,1110	0,2025	0,1422
Medián	0,1213	0,2265	0,1587
Směr. odchylka	0,0517	0,0843	0,0649
Minimum	0,0364	0,0797	0,0448
Maximum	0,2082	0,3753	0,2698
Počet	20	20	19

V datech se nachází jedna odlehlá hodnota u osy Z, a to 0,451, kterou jsem detekoval Grubbsovým testem. Data jsem dále analyzoval bez této hodnoty.

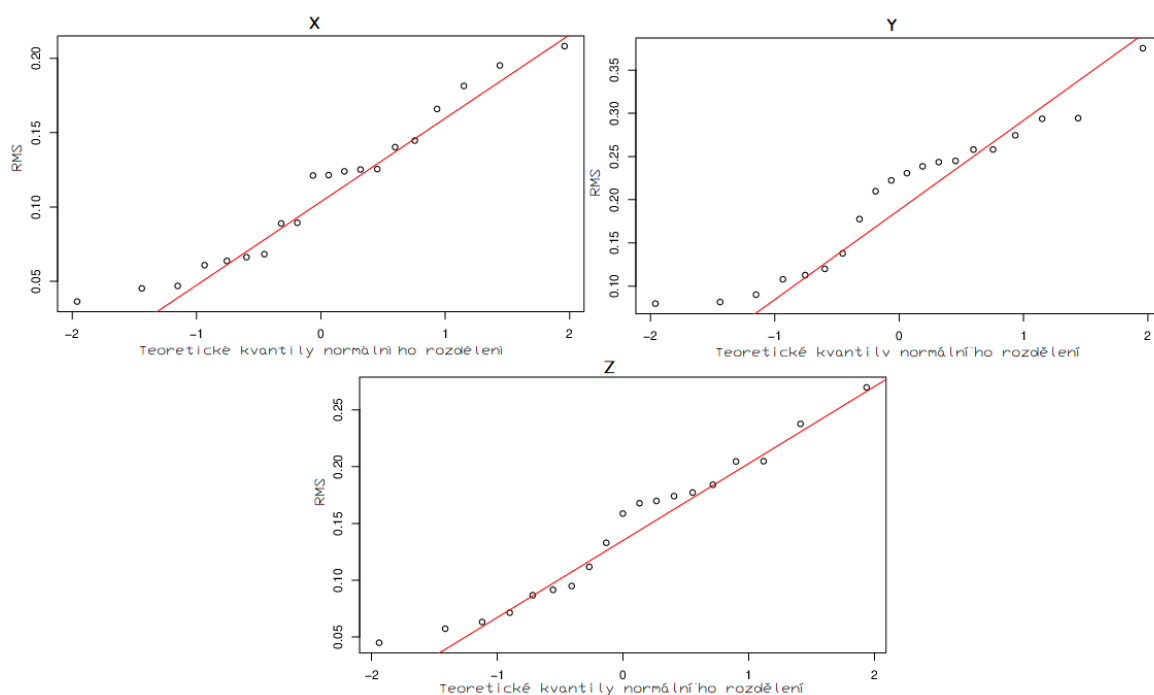
Nejdříve otestujeme každou kategorii na normalitu dat Shapirovým - Wilkovým testem.

H_0 : Data pocházejí z normálního rozdělení

H_A : $\neg H_0$

U všech tří kategorií je $p_{hodnota} > 0,05$; nezamítáme nulovou hypotézu. Můžeme předpokládat, že data pochází z normálního rozdělení.

Na obrázku 21 lze vidět Q-Q grafy jednotlivých skupin. Graf X pro akcelerometr x, Y pro akcelerometr y, Z pro akcelerometr z. Data se jeví podle grafů normálního rozdělení, avšak tuto skutečnost potvrdil až Shapirův-Wilkův test.



Obrázek 21 Q-Q grafy akcelerometrů

Rozptyly se liší, normalita nebyla zamítnuta, proto dále přistoupíme k exaktnímu testu homoskedasticity – Bartlettův test.

H_0 : Data pocházejí z populací se stejnými rozptyly

H_A : $\neg H_0$

$p_{hodnota} = 0,108$

Na hladině významnosti 0,05 nezamítáme předpoklad o shodě rozptylů řezů. Neexistuje statisticky významný rozdíl mezi rozptyly jednotlivých akcelerometrů.

Jsou splněny podmínky pro ANOVU.

H_0 : Data pocházejí z populací se stejnými středními hodnotami

H_A : $\neg H_0$

$p_{hodnota} \ll 0,001$

Na hladině významnosti 0,05 zamítáme H_0 , to znamená, že existuje statisticky významný rozdíl mezi středními hodnotami jednotlivých akcelerometrů. Existuje tedy statisticky významný rozdíl v měření signálů podle umístění akcelerometrů.

Přistoupíme k POST-HOC analýze, respektive k Tukey HSD.

Dle POST-HOC analýzy, kde výsledkem je tabulka 8, lze vidět, že na hladině významnosti 0,05 tvoří homogenní skupinu jen akcelerometry X - Z.

Tabulka 8 POST-HOC analýza akcelerometrů Ostrava

	x	y	z
x	-	-	-
y	<<0,001	-	-
z	0,33	0,021	-

V následující tabulce 9 vidíme efekty jednotlivých akcelerometrů.

Tabulka 9 Efekt akcelerometrů Ostrava

	x	y	z
Efekt	-0,041108	0,050452	-0,0098358

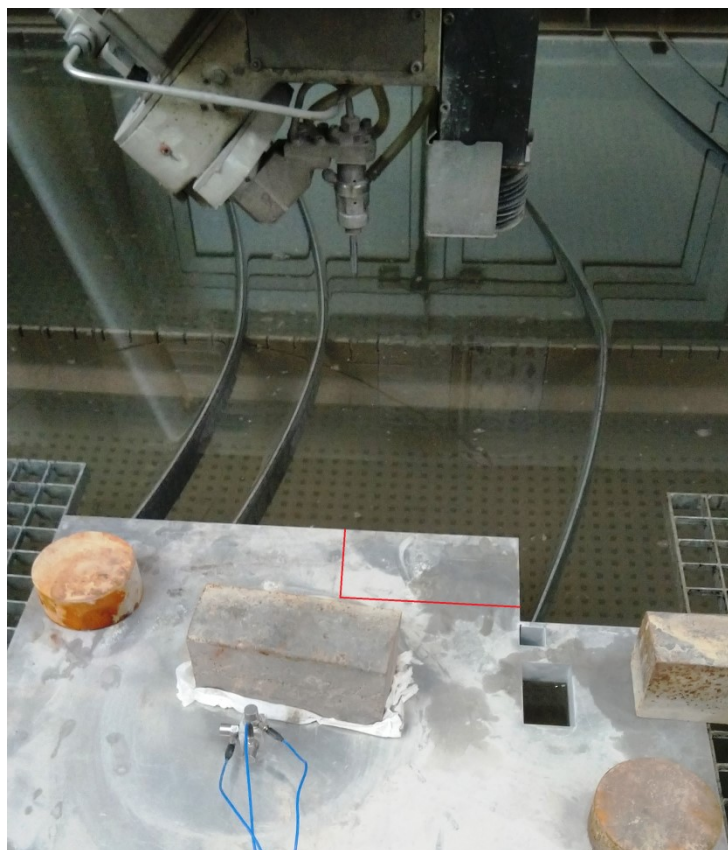
Podle efektů můžeme seřadit akcelerometry podle RMS Y, Z a X. Jednak lze říct, že z hlediska úrovně RMS není jedno, kterým akcelerometrem snímáme vibrace. To znamená, že je statisticky nejlepší z hlediska úrovně RMS měřit akcelerometrem Y a nejhůře akcelerometrem X. Je zajímavé, že akcelerometr Y snímá vibrace z plochy rovnoběžné s řeznou plochou. To je velmi zajímavý a překvapivý úkaz. Pro složitější tvary řezů je rozhodně výhodnější měřit více akcelerometry. Pro lineární řezy lze říct, že je dostačující mít akcelerometr jeden a nejlépe připevněný na ploše rovnoběžné s řeznou plochou. Z globálního a komfortního hlediska měření vibrací z obrobků při řezání abrazivním vodním paprskem v praxi lze udělat kompromis a výhodně měřit vibrace Z akcelerometrem připevněným na plochu obrobku, tedy v ose paprsku, za předpokladu jednoduchých 2D řezů. Při složitějších 3D řezech jsem přesvědčený, že je lepší použít soustavu tří akcelerometrů.

4.4.2 Měření vibrací na duralu při různých parametrech paprsku

Experiment probíhal v Milaně během mé stáže v místní laboratoři kapalinového paprsku. Na polytechnice v Milaně používají abrazivo australský granát mesh 80, průměr trysky 0,32 mm; délka usměrňovací trubice 76 mm a průměr usměrňovací trubice 1,02 mm. Vzdálenost usměrňovací trubice od obrobku byla 2,5 mm. Měřili jsme vzorkovací frekvencí 40 kHz.

Zrychlení jsem zde měřil pomocí nově vyrobeného hranolku. Ten byl připevněn na duralu (stejný materiál, jako hranolek) pomocí šroubku. Řezy probíhaly proti akcelerometru Y, Z akcelerometr byl na vrchní straně, takže směřoval v ose paprsku a X akcelerometr byl kolmý na hranu řezu. Materiál je o tloušťce 25 mm a na obrázku 22 lze vidět červený rámeček, kde

probíhaly řezy. Akcelerometry byly umístěny za ocelovou kostku, aby se zamezilo jejich přílišnému ostřelování abrazivem. Naměřená data použiju k ověření statisticky dokázané závislosti RMS na rychlosti. Zde ověřím pomocí regresní analýzy, zda se závislost rychlosti na RMS zachovává i při různých parametrech vodního paprsku. Dural byl vybrán z důvodu lepší obrobitelnosti než ocel při stejné tloušťce. Dalším důležitým přínosem tohoto měření je, že se paprsek nezačíná generovat mimo materiál, ale zde začínáme řez vrtem materiálu. To nám při sledování grafu přinese informaci, zda takový vrt nezkreslí analýzu signálů a můžeme tak sledovat vývoj RMS během a po skončení vrtu.

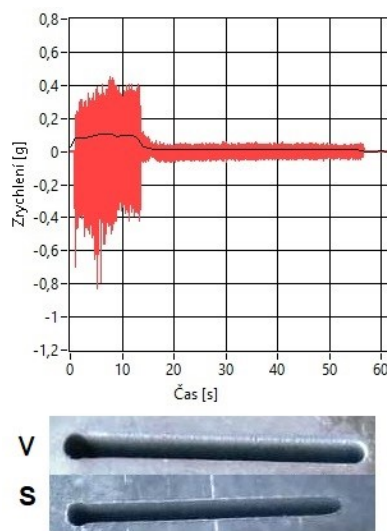


Obrázek 22 Umístění řezu

Proběhla série řezů o délce 20 mm začínající vrtem při různých parametrech vodního paprsku, viz tabulka 10. Řezy A probíhaly při tlaku 250 MPa, průtok abraziva byl 250 g/min a rychlost posuvu byla 25-100 mm/min. Řezy B se prováděly při tlaku 300 MPa, průtok abraziva byl 250 g/min a rychlost posuvu byla 25-100 mm/min. Řezy C se konaly při tlaku 350 MPa, průtok abraziva byl 300 g/min a rychlost posuvu byla 25-100 mm/min. Řezy D byly odlišné i rychlosti posuvu, tlak byl 350 MPa, průtok abraziva byl 300 g/min a rychlost posuvu byla 150-300 mm/min. Grafy k řezům uvedeným v tabulce 10 jsou obsaženy v příloze 3. Parametry jsem zvolil částečně v závislosti na přednastavení knihovny stroje a také tak, aby kvalita prvního řezu byla dobrá a další řezy se zhoršovaly se zvyšující se rychlostí posuvu. Na následujících obrázcích 23, 24, 25 a 26 jsou ukázky řezů s příslušným grafem.

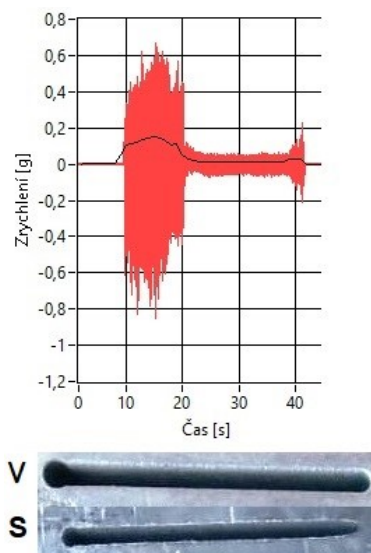
Tabulka 10 RMS řezů Milano

[mm/min]	x	y	z
A: $v_p = 25$	0,043622	0,035924	0,078731
A: $v_p = 50$	0,074234	0,057984	0,150738
A: $v_p = 75$	0,053405	0,040861	0,089629
A: $v_p = 100$	0,079537	0,067671	0,150529
B: $v_p = 25$	0,069082	0,045621	0,129646
B: $v_p = 50$	0,109898	0,080014	0,234052
B: $v_p = 75$	0,111465	0,077805	0,22026
B: $v_p = 100$	0,123058	0,090178	0,255324
C: $v_p = 25$	0,049762	0,064748	0,08868
C: $v_p = 50$	0,104381	0,105528	0,170466
C: $v_p = 75$	0,104375	0,129251	0,165791
C: $v_p = 100$	0,141604	0,161604	0,179595
D: $v_p = 150$	0,27527	0,321228	0,64283
D: $v_p = 200$	0,291407	0,333942	0,656937
D: $v_p = 250$	0,298251	0,34006	0,676634
D: $v_p = 300$	0,309308	0,352845	0,698432



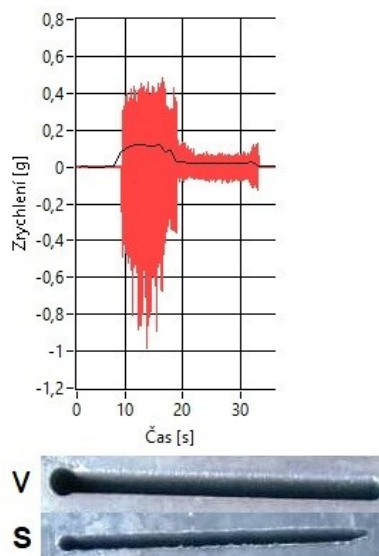
Obrázek 23 Řez A: $v_p = 25$ mm/min

Na obrázku 23 vidíme fotografii řezu a příslušný graf. Část označená „V“ je vrchní část řezu, kdy vlevo na fotografii se paprsek provrtal materiálem a dále postupoval řezem. Část označená „S“ je spodní strana, odkud je paprsek odváděn do odpadní nádrže. Měřítka fotografií mezi sebou neodpovídá. Drážka řezů je kvalitní, neobsahuje vady, parametry takového řezu jsou správně zvoleny. Na grafu vidíme v první části velké amplitudy a nárůst RMS. To je část, kde se paprsek provrtával materiálem. Dále následuje skokový pokles RMS a paprsek přechází do řezu.



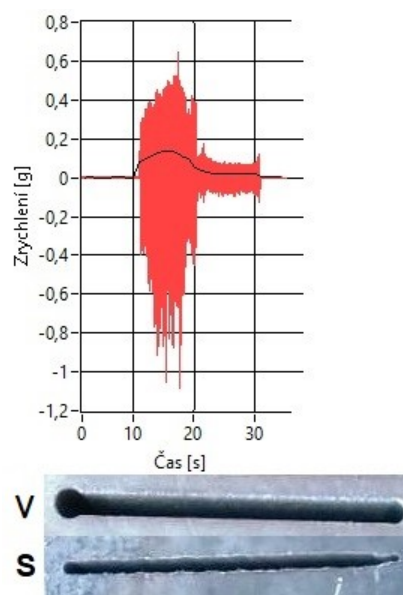
Obrázek 24 Řez A: $v_p = 50$ mm/min

Na obrázku 24 máme analogický postup popsáný výše. Důležité je všimnout si, že spodní strana S je užší a kvalita řezu na spodní straně klesá. Také je konec řezu na spodní straně tenký. V grafu můžeme vypořovat, že konec řezu doprovází zvýšení RMS. To si vysvětlují vznikajícím nedořezem na konci drážky kvůli vyšší postupové rychlosti.



Obrázek 25 Řez A: $v_p = 75$ mm/min

Při ještě větším zvýšení postupové rychlosti se drážka na výstupní straně ještě více ztenčí. Na obrázku 25 je zjevné, že kvality hran spodní strany S jsou již značně špatné a na konci vzniká opět nedořez doprovázený nárůstem RMS.



Obrázek 26 Řez A: $v_p = 100$ mm/min

Na obrázku 26 můžeme sledovat trend zhoršování a zužování drážky na straně S doprovázené vznikem nedořezu na konci. Na výstupní straně zaniká místo výstupu paprsku při vrtu.

Výše zmíněné obrázky jsou pěkným ukazatelem toho, jak se odráží rychlost na řezech a s tím spojených signálech vibrací měřených na obráběném materiálu. Pro porovnání všech výstupů paprsku je zde obrázek 27, kde lze vypořadovat, že zhoršující se kvalita přináší také zkrácení řezu, respektive jeho posunutí doleva, které je důsledkem vznikajícího nedořezu a zanikající stopě po vrtu za vzniku striací, kdy paprsek při zvýšené rychlosti posuvu vyšlehává při svém zpoždění materiál za sebou.

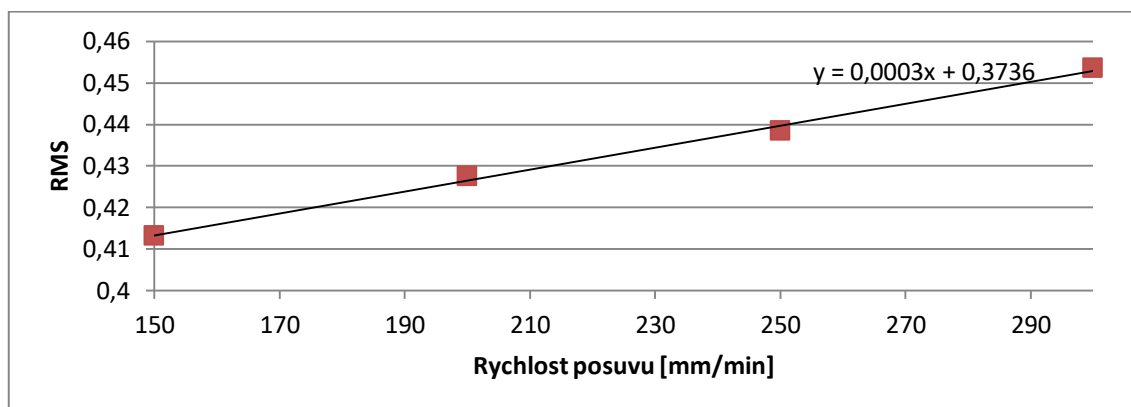


Obrázek 27 Porovnání spodní strany řezů

Pro posouzení závislosti RMS na rychlosti posuvu řezů A až D použiju dva jednoduché grafy a regresní analýzu. Pro jednotlivé rychlosti posuvu v_p [mm/min] řezů A až D jsem sestavil tabulku 11 RMS jednotlivých řezů. Na konci sloupečků tabulky 11 je potom tučným písmem střední hodnota RMS jednotlivých rychlostí posuvu. Regresní analýzou vyšetřuji závislost středních hodnot RMS s rychlostí posuvu. Tahle analýza by nám měla jednoduše a orientačně dokázat, že RMS je závislé na rychlosti posuvu i při různých parametrech paprsku, a ukázat nám sílu závislosti.

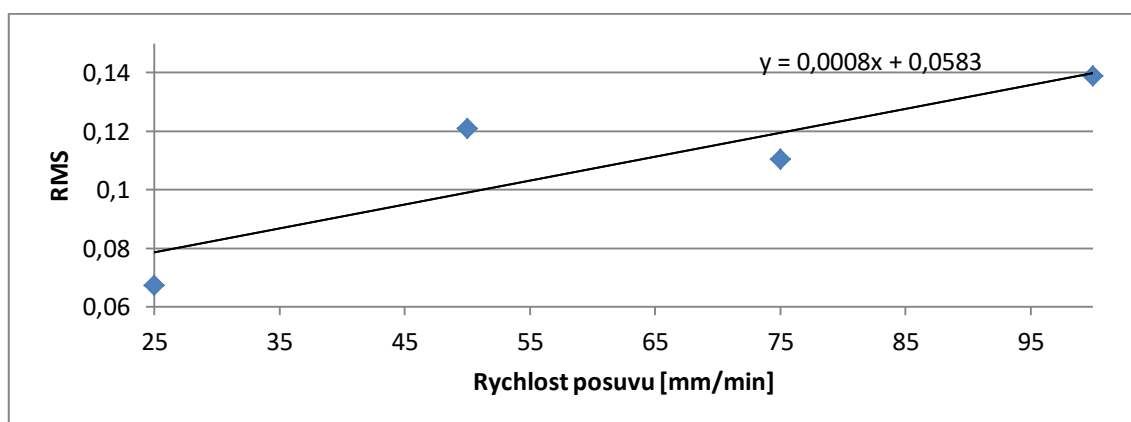
Tabulka 11 RMS pro určité rychlosti posuvu

$v_p = 25$	$v_p = 50$	$v_p = 75$	$v_p = 100$	$v_p = 150$	$v_p = 200$	$v_p = 250$	$v_p = 300$
0,0359239	0,0579841	0,0408609	0,0676708	0,321228	0,333942	0,34006	0,352845
0,0436222	0,0742337	0,0534046	0,0795374	0,27527	0,291407	0,298251	0,309308
0,0787309	0,150738	0,0896286	0,150529	0,64283	0,656937	0,676634	0,698432
0,0456207	0,0800139	0,0778048	0,0901781				
0,0690815	0,109898	0,111465	0,123058				
0,129646	0,234052	0,22026	0,255324				
0,0647482	0,105528	0,129251	0,161604				
0,0497622	0,104381	0,104375	0,141604				
0,08868	0,170466	0,165791	0,179595				
0,06731284	0,12081052	0,11031566	0,13878892	0,41310933	0,42742867	0,438315	0,45352833



Obrázek 28 Lineární závislost pro $v_p = 150-300$ mm/min

Na obrázku 28 vidíme graf, kde jde vidět lineární závislost rychlosti posuvu na RMS. Na graf i závislost je potřeba pohlížet jako na orientační důkaz korelace, protože není použito při vypracování dostatečné množství dat. Koeficient korelace je 0,998, to značí, že korelace je opravdu velká a závislost můžeme považovat za lineární.



Obrázek 29 Lineární závislost pro $v_p = 20-100$ mm/min

U nižších rychlostí bylo k dispozici více dat. Jak lze na obrázku 29 vypořádat, závislost rychlosti posuvu na RMS není od pohledu tak pěkná. Koeficient korelace je 0,87, to značí, že korelace je pořád dostatečně velká a závislost můžeme považovat za lineární.

Je nutné podotknout, že koeficienty lineární závislosti nelze paušalizovat na obecnou rovinu, protože u jiných strojů za jiných podmínek se může závislost chovat odlišně. Důležité pro online monitoring však je, že závislost RMS na rychlosti posuvu existuje.

Dále statisticky ověřím, zda závislost měření vibrací na umístění akcelerometrů na obrobku zjištěná při analýze dat z Ostravy, se objeví i v datech z Milána. Pro statistiku použiju tabulku 10. Zde jsou akcelerometry X, Y a Z pojmenované podle toho, ve kterém směru osy jsou připevněny. V tabulce 12 jsou základní statistické veličiny. Z dat lze vypořádat, že nejspíš nebudou z normálního rozdělení.

Tabulka 12 Výběrové charakteristiky RMS akcelerometrů Milano

	x	y	z
Stř. hodnota	0,1399	0,1441	0,2868
Medián	0,1071	0,0851	0,1750
Směr. odchylka	0,0957	0,1196	0,2333
Minimum	0,0436	0,0359	0,0787
Maximum	0,3093	0,3528	0,6984
Počet	16	16	16

Pomocí Dixonova testu jsem zjistil, že v datech se nenachází odlehlé hodnoty. Nejdříve otestujeme každou kategorii na normalitu dat pomocí Shapirovým - Wilkovým testem.

H_0 : Data pocházejí z normálního rozdělení

H_A : $\neg H_0$

U všech tří kategorií je $p_{hodnota} \ll 0,05$; zamítáme nulovou hypotézu. Můžeme předpokládat, že data nepocházejí z normálního rozdělení.

Rozptýly se liší, normalita byla zamítnuta, proto dále přistoupíme ke Kruskalovu-Wallisovu testu.

H_0 : Data pocházejí z populací se stejnými mediány

H_A : $\neg H_0$

$p_{hodnota} = 0,02$

Na hladině významnosti 0,05 zamítáme H_0 , to znamená, že existuje statisticky významný rozdíl mezi mediány jednotlivých akcelerometrů. Existuje tedy statisticky významný rozdíl v měření signálů podle umístění akcelerometrů.

Přistoupíme k POST-HOC analýze, respektive k Dunnové metodě.

Podle této analýzy, kde výsledkem je tabulka 13, lze vidět, že na hladině významnosti 0,05 tvoří homogenní skupinu jen akcelerometry X - Y.

Tabulka 13 POST-HOC analýza akcelerometrů Milano

	x	y	z
x	-	-	-
y	0,42	-	-
z	0,01	0,007	-

V následující tabulce 14 vidíme efekty jednotlivých akcelerometrů.

Tabulka 14 Efekt akcelerometrů Milano

	x	y	z
Efekt	-0,05034	-0,04618	0,096513

Podle efektů můžeme seřadit akcelerometry podle RMS Z, Y a X. Znovu se ukázalo, že z hlediska úrovně RMS není jedno, kterým akcelerometrem snímáme vibrace z obráběného materiálu. Podle těchto dat je nejlepší z hlediska úrovně RMS měřit akcelerometrem Z a nejhůře akcelerometrem X. Znovu se ukázala výhoda měření vibrací hned z povrchu pomocí akcelerometru Z. Odlišnost výsledků efektů akcelerometrů u měření z Milana oproti výsledku experimentu z Ostravy je možná z důvodu použití jiného materiálu, protože se dural chová při řezech jinak, než ocel. Další důvodem může být rozdílný stroj, který má trochu odlišné vlastnosti při řezech a rozkmitává tak obrobek v jiných směrech. Proto se nedají výsledky paušalizovat a je výhodné měřit buď jedním akcelerometrem upevněným na povrch obrobku, nebo soustavou akcelerometrů. K testování byl použit neparametrický Kruskal-Wallisův test, který je slabší než Anova test použitý k podobné analýze akcelerometrů při měření v Ostravě.

4.5 Návrh pracovního postupu

Moderní stroje AWJ jsou vybaveny výbornou softwarovou podporou, takže během přípravy programu na obrábění se někdy zadává do softwaru také tloušťka a druh materiálu a systém tak sám vypočítá parametry řezu. V laboratoři kapalinového paprsku Katedry fyziky takový moderní stroj není, takže se postupová rychlost řezu vypočítává „ručně“. V obou případech je možné, že nastavené parametry paprsku při obrábění tlustého nebo těžkoobrobitelného materiálu nebudou v některých situacích dostačující pro úplné prořezání materiálu. Následující postup je doporučení, které vyvozují z této práce a které využíváme v laboratoři.

Jakmile neznáme postupovou rychlost pro určitý materiál, uděláme kontrolní řez, kdy rychlost ze zkušenosti odhadneme. Na řezné ploše se podle zoptimalizované metody změří deklinační úhel θ_{vp} v místě výstupu paprsku z materiálu a vypočítá se limitní rychlost pro deklinační limitní úhel $\theta_{lim} = 45^\circ$ (U tenkých a středně tlustých materiálů používáme hodnotu 45° , u tlustých vzorků

je limitní úhel menší.) podle vztahu: $\theta_{v_p} = \theta_{lim} \left(\frac{v_p}{v_{p_{lim}}} \right)^{1,5}$. Poté se podle stejného vzorce vypočítá postupová rychlost v_p tak, že navolíme deklinační úhel θ_{v_p} , který odpovídá požadované kvalitě řezu. [35]

Dalším důležitým krokem je připevnit na materiál akcelerometry. Pokud se jedná o jednoduché lineární řezy, může se akcelerometr na materiál připevnit jeden a to na jeho vrchní povrch. Pokud se provádí složité 3D řezy, nebo obráběný tvar je příliš složitý, je lepší použít soustavu tří akcelerometrů, které je možné upevnit díky hranolku. Je lepší zabránit přílišnému stříkání abraziva a vody na akcelerometry z důvodu možného zkreslení signálu. Na feromagnetické materiály je možné hranolek připevnit pomocí magnetu, u tenčích materiálů je možné použít šroub, u tlustších svorník, nebo lepidlo. Je vždy lepší zachovat směr akcelerometrů souhlasně s osami stroje pro případnou analýzu a také pro přesnější sledování online signálu. Pro online monitoring používám software LabVIEW Sound and Vibration Assistant. Zde sleduji RMS signálu. Pro přesnější vyhodnocení možného nedořezu v reálném čase je lepší sledovat konturu řezu. Sleduji RMS signálu akcelerometru, který je kolmý na konturu řezu. Tohle doporučení ovšem nemusí platit u všech strojů, jak ukázalo při vyhodnocování experimentu z Milana. Jakékoliv větší skoky RMS jsou odezva na nedořezy nebo poruchy, které během řezu nastaly, a tím se zhoršila schopnost obrábění. Na obrázku 30 je program, který v laboratoři používáme na online monitoring řezu. V okně 1 je načítající se časový signál. Už z úrovně amplitudy časového signálu lze vyčíst, kdy stroj začal řezat do materiálu a kdy z materiálu vyjel. Také lze vypožorovat anomálie během řezu. V okně 2 je efektivní hodnota signálu. Zde lze odhadnout, zda při řezu vzniká nějaký problém. Pokud je například postupová rychlost příliš velká a díky nehomogenitě materiálu začnou vznikat nedořezy, je možné tyto nedořezy registrovat pozorováním skokového nárůstu RMS a operativně snížit rychlost řezu.



Obrázek 30 Online monitoring řezu

Závěr

V této diplomové práci jsem se zabýval optimalizací vrtání a řezání těžkoobrobitelných materiálů. Pro pochopení problematiky bylo potřeba nastudovat základní disciplíny související s řezáním abrazivního vodního paprsku, měřením vibrací akcelerometry a nezbytné také bylo prostudovat články související s tímhle tématem. Pro pochopení možných zákonitostí při vzniku vibrací jsem nastudoval makroskopický fyzikální popis interakce paprsku s materiálem. Kinetická energie abrazivních částic unášených vodním paprskem se zčásti spotřebuje na porušení vazeb materiálu, část energie se předává do okolí formou akustických kmitů a část se přemění na jiné druhy energie. Při špatně nastavených parametrech paprsku, kdy nedochází k prořezání materiálů, se spotřebuje méně energie k porušení vazeb a tím více se energie šíří materiálem. Tuhle změnu můžeme zaznamenat akcelerometry mimo jiné ve formě vibrací.

Cílem práce tedy bylo najít souvislosti mezi řezem pomocí AWJ a vibracemi vznikajícími na obráběném materiálu tak, aby mohl být navrhnout pracovní postup, který by pomohl snížit ekonomickou náročnost při obrábění těžkoobrobitelných materiálů. Jednou z hlavních motivací bylo uvedení takového postupu online měření během obrábění materiálů právě v laboratoři kapalinového paprsku Katedry fyziky, protože by se snížila spotřeba abraziva a časová náročnost při řezání tlustých materiálů.

O měření vibrací na obrobku jsem se začal zajímat po ukončení bakalářského studia, kdy jsem nabral zkušenosti z měření vibrací na řezné hlavici. V experimentální části této práce byla použita jednak data naměřená v Milaně během méj praktické stáže v Politecnico di Milano, kde jsem vyrobil hranolek pro upevnění tří akcelerometrů, a dále experimentů prováděných v laboratoři kapalinového paprsku Katedry fyziky, kdy jsem navrhl experiment s parametry řezání a provedl zkušební řezy. Po analýze teoretických znalostí z oblasti měření vibrací během řezu AWJ jsem započal upravovat programy v LabVIEW a dospěl k programu 2, kterým jsem analyzoval všechna data. Pro vyhodnocení řezů používám statistickou hodnotu RMS.

Z experimentů provedených v Ostravě jsem popsal souvislost mezi RMS a rychlostí posuvu. Pro potvrzení této teze jsem použil statistickou analýzu. Potvrdilo se, že závislost efektivní hodnoty signálu řezu na rychlosti posuvu je statisticky významná. Tohle zjištění bylo velmi důležité pro další analýzu. Pro zjištění, kterými akcelerometry by bylo nejvýhodnější měřit vibrace na obráběném materiálu, jsem proto provedl další statistickou analýzu, kde jsem zjistil, že z hlediska úrovně efektivní hodnoty není jedno, kterým akcelerometrem snímáme vibrace. Statisticky významně je nejlepší z hlediska úrovně RMS v laboratoři v Ostravě měřit akcelerometrem Y a nejhůře akcelerometrem X (který je proti směru řezu). Je zajímavé, že akcelerometr Y snímá vibrace z plochy rovnoběžné s řeznou plochou. Z Milánského experimentu vyšlo, že je lepší měřit akcelerometrem Z, který je umístěný na povrchu materiálu. Efektem na tom byl nejhůře znovu akcelerometr X, který teď ovšem měřil vibrace z plochy rovnoběžné s řeznou plochou. Pro složitější trajektorie řezu nebo 3D řezu proto doporučuji měřit soustavou tří akcelerometrů a pro jednodušší lineární řezy stačí měřit jedním akcelerometrem Z připevněným na povrch materiálu tak, že akcelerometr snímá vibrace rovnoběžné k paprsku.

Díky lineární závislosti mezi RMS a rychlostí posuvu, která se potvrdila při analýze dat z Milana, lze předpokládat, že pro komplexnější popis závislosti RMS na rychlosti a s tím možnou detekci poruch řezu je důležité pokusit se zobecnit závislost pro určité druhy materiálu, pro určité stroje. Zobecněním a nalezením skupin, kde je lineární závislost stejná, nebo hodně podobná, by bylo možné totiž predikovat, jak velká efektivní hodnota v daném řezu by měla být u konkrétní skupiny. Abnormální nuance RMS během řezu jsou potom oním hledaným, velmi jednoduchým nástrojem pro přesnou detekci poruch řezů.

Výsledky práce jsou velmi důležité pro další výzkumy v laboratoři kapalinového paprsku. Pracovní postup pro laboratoř v Ostravě, který jsem navrhl v této práci, bude plně využit při dalších experimentech a řezech. Zjištění souvislostí při měření vibrací na obráběném materiálu také mohou využít při svých experimentech pracovníci v dalších laboratořích. Pro budoucí výzkum online monitorování abrazivního vodního paprsku a uvedení poznatků do praxe se může hodit přihlédnout k výsledkům této práce.

Bibliografie

- [1] PAHUJA, Rishi a Mamidala RAMULU. Abrasive waterjet process monitoring through acoustic and vibration signals. In: Conference: 24th International Conference on Water Jetting. Manchester, UK, 2018.
- [2] KALIČINSKÝ, Jiří. Řízení technologických parametrů kapalinového paprsku při porušování materiálů [online]. Ostrava, 2009 [cit. 2018-02-20]. Disertační práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.
- [3] AXINTE, D.A. a M.C. KONG. An integrated monitoring method to supervise waterjet machining. CIRP Annals [online]. 2009, 58(1), 303-306 [cit. 2018-04-16]. DOI: 10.1016/j.cirp.2009.03.022. ISSN 00078506.
- [4] KRENICKY, Tibor a Miroslav RIMÁR. Monitoring of Vibrations in the Technology of AWJ. Key Engineering Materials [online]. 2011, 2012(496), 229-234 [cit. 2018-04-01]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.496.229. ISSN 1662-9795.
- [5] HREHA, Pavol, Agata RADVANSKA, Lucia KNAPCIKOVA, Grzegorz KRÓLCZYK, Stanisław LEGUTKO, Jolanta KRÓLCZYK, Sergej HLOCH a Peter MONKA. Roughness Parameters Calculation By Means Of On-Line Vibration Monitoring Emerging From AWJ Interaction With Material. Metrology and Measurement Systems [online]. 2015, 22(2), - [cit. 2018-02-20]. DOI: 10.1515/mms-2015-0024. ISSN 2300-1941.
- [6] MIKLER, Jerzy. On use of acoustic emission in monitoring of under and over abrasion during a water jet milling process. Journal of Machine Engineering [online]. 2014(142), 104-115 [cit. 2018-04-01].
- [7] BRYM, Radek. TRENDY VÝVOJE OBRÁBĚNÍ VODNÍM PAPERSEKEM [online]. Brno, 2008 [cit. 2020-03-14]. Diplomová práce. VUT BRNO.
- [8] HLAVÁČOVÁ, Irena. VYSOKOENERGETICKÝ VODNÍ PAPERSEK A JEHO INTERAKCE S PROSTŘEDÍM. Praha, 2012. Habilitační práce. ČVUT.
- [9] MIYNARCZUK, Mariusz, Marta SKIBA, Libor SITEK, Petr HLAVÁČEK a Alena KOŽUŠNÍKOVÁ. The Research into the Quality of Rock Surfaces Obtained by Abrasive Water Jet Cutting. Archives of Mining Sciences [online]. 2014, 59(4), 925-940 [cit. 2020-03-28]. DOI: 10.2478/amsc-2014-0064. ISSN 1689-0469. Dostupné z: <http://journals.pan.pl/dlibra/publication/108054/edition/93700/content>
- [10] ORBANIC, H. a M. JUNKAR. Analysis of striation formation mechanism in abrasive water jet cutting. Wear [online]. 2008, 265(5-6), 821-830 [cit. 2020-03-17]. DOI: 10.1016/j.wear.2008.01.018. ISSN 00431648. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0043164808000148>

- [11] STRNADEL, B., L.M. HLAVÁČ a L. GEMBALOVÁ. Effect of steel structure on the declination angle in AWJ cutting. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 2013, 64, 12-19 [cit. 2020-03-17]. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2012.07.015. ISSN 08906955. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0890695512001563>
- [12] HLAVÁČ, L.M., I.M. HLAVÁČOVÁ, L. GEMBALOVÁ, J. KALIČINSKÝ, S. FABIAN, J. MĚŠTÁNEK, J. KMEC a V. MÁDR. Experimental method for the investigation of the abrasive water jet cutting quality. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2009, 209(20), 6190-6195 [cit. 2020-03-17]. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2009.04.011. ISSN 09240136. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013609001605>
- [13] HLAVÁČ, Libor, Irena HLAVÁČOVÁ, Vladan GERYK a Štefan PLANČÁR. Investigation of the taper of kerfs cut in steels by AWJ. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2015, 77(9-12), 1811-1818 [cit. 2020-03-17]. DOI: 10.1007/s00170-014-6578-9. ISSN 0268-3768. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s00170-014-6578-9>
- [14] HLAVÁČ, Libor. Teoretický model abrazivního kapalinového paprsku. *Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské - Technické univerzity Ostrava. Řada hornicko-geologická* [online]. 2001, 47(1), 51-62 [cit. 2018-04-12]. ISSN 0474-8476.
- [15] PTV kalkulátor drsnosti povrchu. PTV výroba strojů pro řezání vodním paprskem [online]. [cit. 2020-03-15]. Dostupné z: <http://www.ptv.cz/kalkulator-drsnosti-povrchu/>
- [16] HASHISH, Mohamed. A Modeling Study of Metal Cutting With Abrasive Waterjets. *Journal of Engineering Materials and Technology* [online]. 1984, 106(1), 88-100 [cit. 2020-02-23]. DOI: 10.1115/1.3225682. ISSN 0094-4289. Dostupné z: <https://asmedigitalcollection.asme.org/materialstechnology/article/106/1/88/385054/A-Modeling-Study-of-Metal-Cutting-With-Abrasive>
- [17] HASHISH, Mohamed. A Model for Abrasive-Waterjet (AWJ) Machining. *Journal of Engineering Materials and Technology* [online]. 1989, 111(2), 154-162 [cit. 2020-02-23]. DOI: 10.1115/1.3226448. ISSN 0094-4289. Dostupné z: <https://asmedigitalcollection.asme.org/materialstechnology/article/111/2/154/401771/A-Model-for-AbrasiveWaterjet-AWJ-Machining>
- [18] HASHISH, M. Prediction Models for AWJ Machining Operations: Proc. of the 7th American Water Jet Conference, M. Hashish (ed.). WJTA, Seattle, Washington, 1993. 175-189.
- [19] ZENG, Jiyue a Thomas KIM. Development of an Abrasive Waterjet Kerf Cutting Model for Brittle Materials. LICHTAROWICZ, A., ed., A. LICHTAROWICZ. *Jet Cutting Technology* [online]. Dordrecht: Springer Netherlands, 1992, s. 483-501 [cit. 2020-02-23]. Fluid Mechanics and Its Applications. DOI: 10.1007/978-94-011-2678-6_33. ISBN 978-94-010-5185-9. Dostupné z: http://link.springer.com/10.1007/978-94-011-2678-6_33

- [20] HLAVÁČ, Libor. Makroskopický fyzikální popis interakce kapalinového paprsku vysoké energie s materiálem: Macroscopic physical description of high-energy liquid jet interaction with material. V Praze: České vysoké učení technické, 2006. ISBN 80-01-03465-8.
- [21] HLAVÁČ, Libor. Model pro řízení parametrů kapalinového paprsku při porušování materiálů v pevné fázi. Ostrava, 2000. Disertační práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.
- [22] HLAVÁČ, Libor. Model of disintegration of hot rock-like materials by water jet. In: Engineering Mechanics: Institut of Theoretical and Applied Mechanics. Praha, 2003, s. 1-14.
- [23] BORTLÍK, Pavel. VIBRODIAGNOSTICKÝ SYSTÉM [online]. Brno, 2015 [cit. 2018-04-03]. DIPLOMOVÁ PRÁCE. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ.
- [24] ŠTANCL, František. Detekce pohybu pomocí inerciálních senzorů [online]. Brno, 2015 [cit. 2020-03-17]. Diplomová práce. VUT BRNO.
- [25] JURÁNEK, Martin. Prostředky automatického řízení: Průvodce akcelerometry pro začátečníky. In: Homel.vsb [online]. [cit. 2020-03-17]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~jur286/prostredky_aut_rizeni/preklad.htm
- [26] ICP PCB 352C33. PCB PIEZOTRONICS [online]. [cit. 2018-03-03]. Dostupné z: <http://www.pcb.com/products.aspx?m=352C33#tabs-2>
http://www.pcb.com/Resources/Technical-Information/Tech_Accel
- [27] Introduction to ICP® Accelerometers. In: PCB.com [online]. [cit. 2020-03-17]. Dostupné z: <https://www.pcb.com/resources/technical-information/introduction-to-accelerometers>
- [28] HORÁK, Karel. Úvod do zpracování signálů [online]. b.r. [cit. 2020-04-15]. Dostupné z: http://midas.uamt.feec.vutbr.cz/ZVS/Lectures/01_Uvod_do_zpracovani_signalu.pdf. Přednáška. VUT.
- [29] TETI, R., K. JEMIELNIAK, G. O'DONNELL a D. DORNFELD. Advanced monitoring of machining operations. CIRP Annals [online]. 2010, 59(2), 717-739 [cit. 2020-03-19]. DOI: 10.1016/j.cirp.2010.05.010. ISSN 00078506. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0007850610001976>
- [30] SHENG, Mao, Shouceng TIAN, Bo ZHANG a Hongkui GE. Frequency analysis of multi-sources acoustic emission from high-velocity waterjet rock drilling and its indicator to drilling efficiency. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences [online]. 2019, 115, 137-144 [cit. 2020-03-19]. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2019.01.005. ISSN 13651609. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1365160918312322>
- [31] KOVACEVIC, R, H-S KWAK a R MOHAN. Acoustic emission sensing as a tool for understanding the mechanisms of abrasive water jet drilling of difficult-to-machine materials. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of

- Engineering Manufacture [online]. 2005, 212(1), 45-58 [cit. 2020-03-19]. DOI: 10.1243/0954405981515491. ISSN 0954-4054. Dostupné z: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1243/0954405981515491>
- [32] MUSIL, Karel. Sezónnost a periodicitu v časových řadách [online]. Praha, 2011 [cit. 2020-05-01]. Dostupné z: <https://is.cuni.cz/webapps/zzp/detail/91600>. Bakalářská práce. Univerzita Karlova v Praze. Vedoucí práce Mgr. Petr Jonáš.
- [33] Frekvenční a výkonové spektrum. In: Wikiskripta [online]. [cit. 2020-03-30]. Dostupné z: https://www.wikiskripta.eu/w/Frekven%C4%8Dn%C3%AD_a_v%C3%BDkonov%C3%A9_spektrum#Frekven.C4.8Dn.C3.AD_spektrum
- [34] SMETANA, Ctirad. Hluk a vibrace: měření a hodnocení. 1. vyd. Praha: Sdělovací technika, 1998. ISBN 80-901936-2-5.
- [35] GEMBALOVÁ, Lucie. Určování fyzikálně - mechanických vlastností materiálu z jeho porušení kapalinovým paprskem [online]. Ostrava, 2010 [cit. 2020-04-26]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10084/83411>. Disertační práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.

Seznam příloh

Příloha 1 Diagram vyhodnocovacího programu 2

Diagram 1 vyhodnocovacího programu 2	1
--	---

Příloha 2 Časové grafy k 4.4.1 Měření vibrací na stejném druhu materiálu o různých tloušťkách

Graf 1 tloušťka 10 mm, akcelerometr X	2
Graf 2 tloušťka 10 mm, akcelerometr Y	2
Graf 3 tloušťka 10 mm, akcelerometr Z	2
Graf 4 tloušťka 15 mm, akcelerometr X	3
Graf 5 tloušťka 15 mm, akcelerometr Y	3
Graf 6 tloušťka 15 mm, akcelerometr Z	3
Graf 7 tloušťka 20 mm, akcelerometr X	4
Graf 8 tloušťka 20 mm, akcelerometr Y	4
Graf 9 tloušťka 20 mm, akcelerometr Z	4
Graf 10 tloušťka 25 mm, akcelerometr X	5
Graf 11 tloušťka 25 mm, akcelerometr Y	5
Graf 12 tloušťka 25 mm, akcelerometr Z	5
Graf 13 tloušťka 30 mm, akcelerometr X	6
Graf 14 tloušťka 30 mm, akcelerometr Y	6
Graf 15 tloušťka 30 mm, akcelerometr Z	6

Příloha 3 Časové grafy k 4.4.2 Měření vibrací na duralu při různých parametrech paprsku

Graf Milano 1 řez A, akcelerometr X	7
Graf Milano 2 řez A, akcelerometr Y	7
Graf Milano 3 řez A, akcelerometr Z	7
Graf Milano 4 řez B, akcelerometr X	8
Graf Milano 5 řez B, akcelerometr Y	8
Graf Milano 6 řez B, akcelerometr Z	8
Graf Milano 7 řez C, akcelerometr X	9
Graf Milano 8 řez C, akcelerometr Y	9
Graf Milano 9 řez C, akcelerometr Z	9
Graf Milano 10 řez D, akcelerometr X	10
Graf Milano 11 řez D, akcelerometr Y	10
Graf Milano 12 řez D, akcelerometr Z	10

Příloha 1 Diagram vyhodnocovacího programu 2

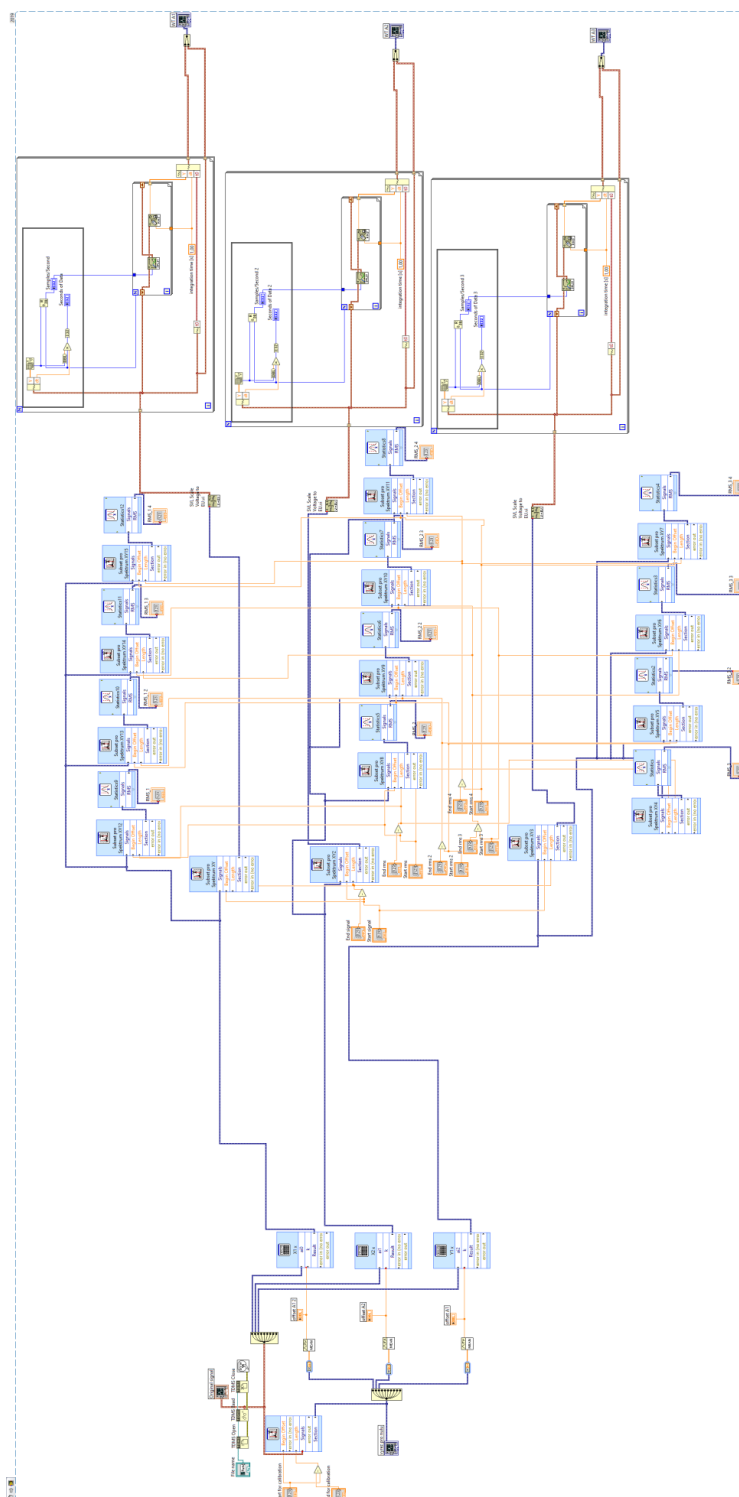
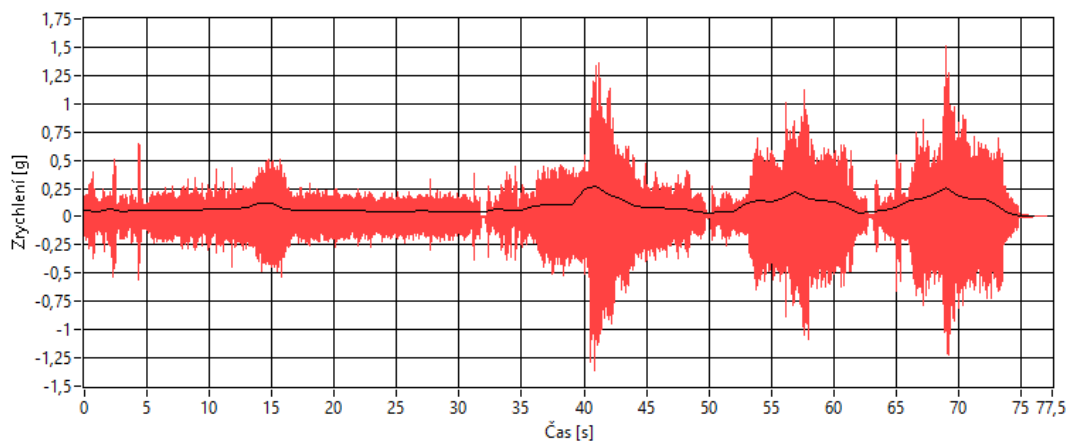
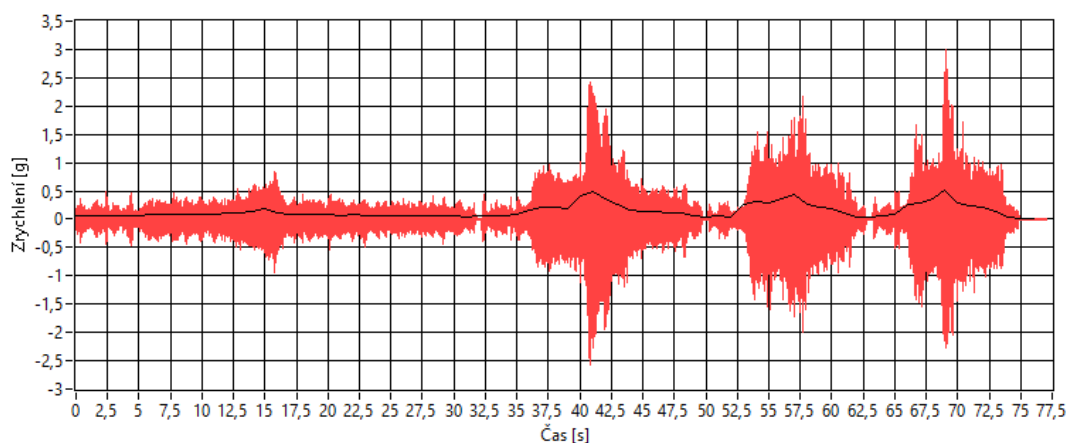


Diagram 1 vyhodnocovacího programu 2

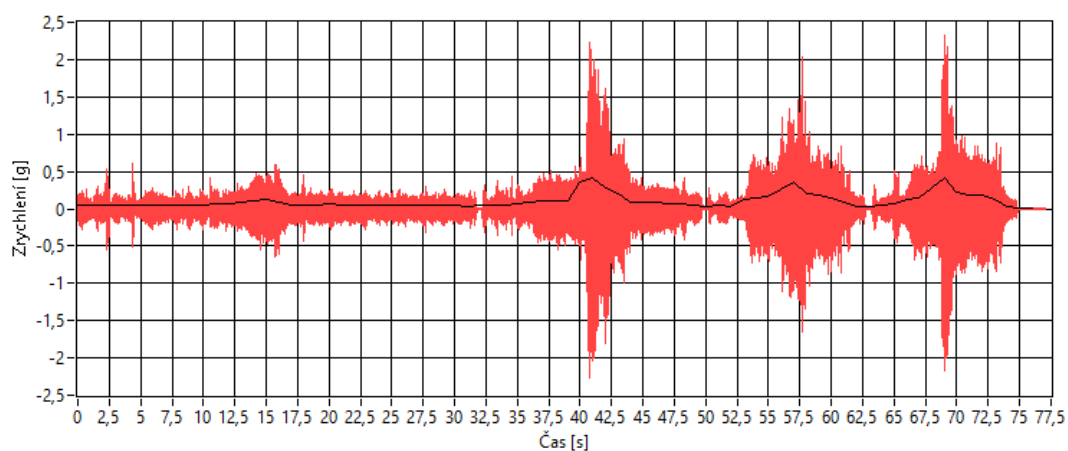
Příloha 2 Časové grafy k 4.4.1 Měření vibrací na stejném druhu materiálu o různých tloušťkách



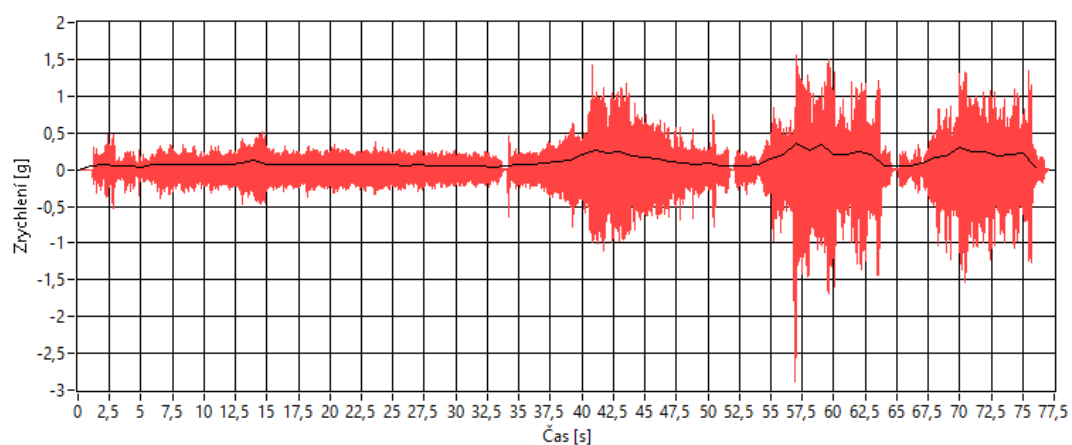
Graf 1 tloušťka 10 mm, akcelerometr X



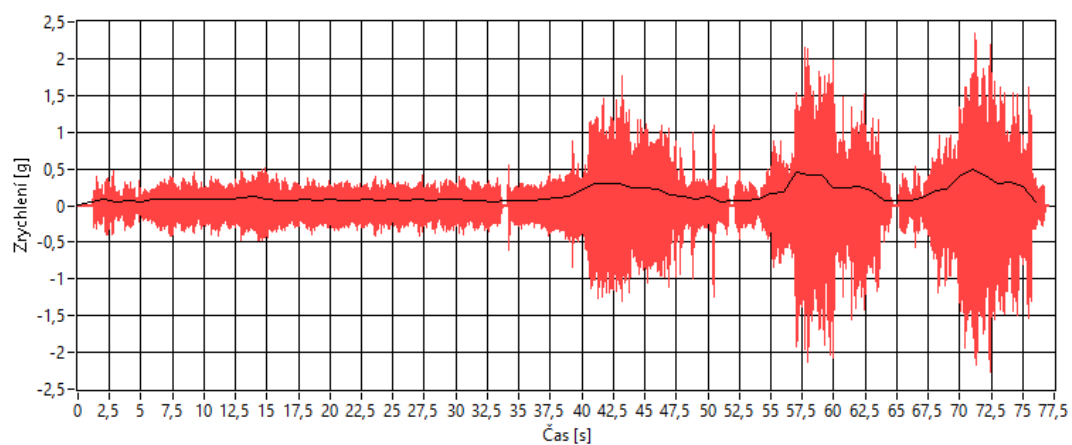
Graf 2 tloušťka 10 mm, akcelerometr Y



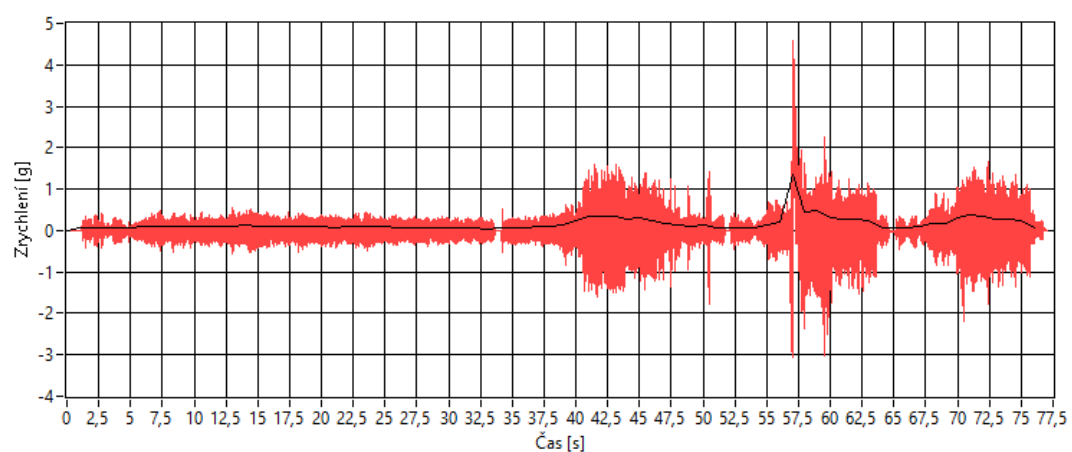
Graf 3 tloušťka 10 mm, akcelerometr Z



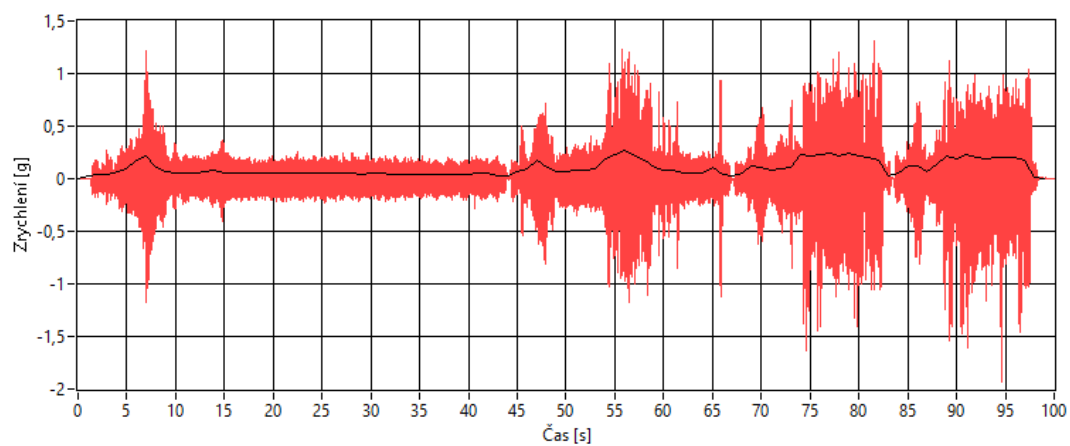
Graf 4 tloušťka 15 mm, akcelerometr X



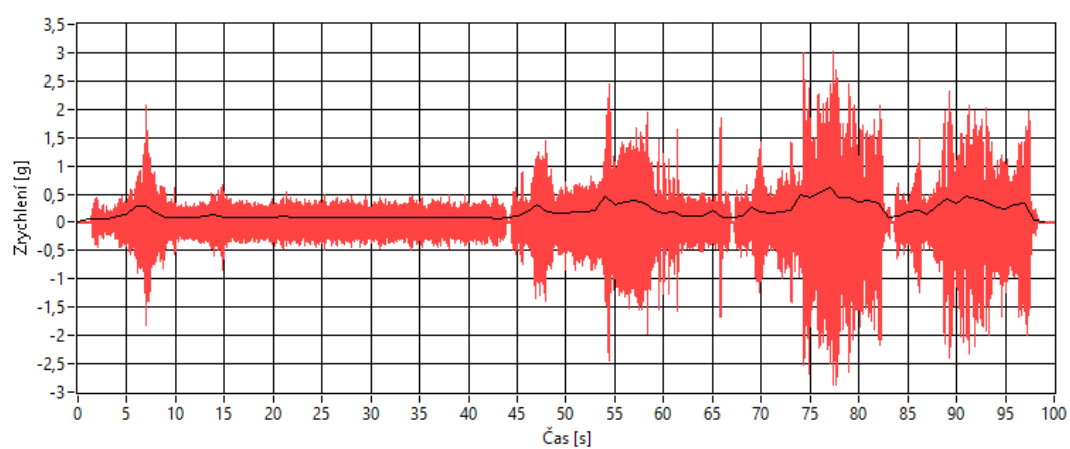
Graf 5 tloušťka 15 mm, akcelerometr Y



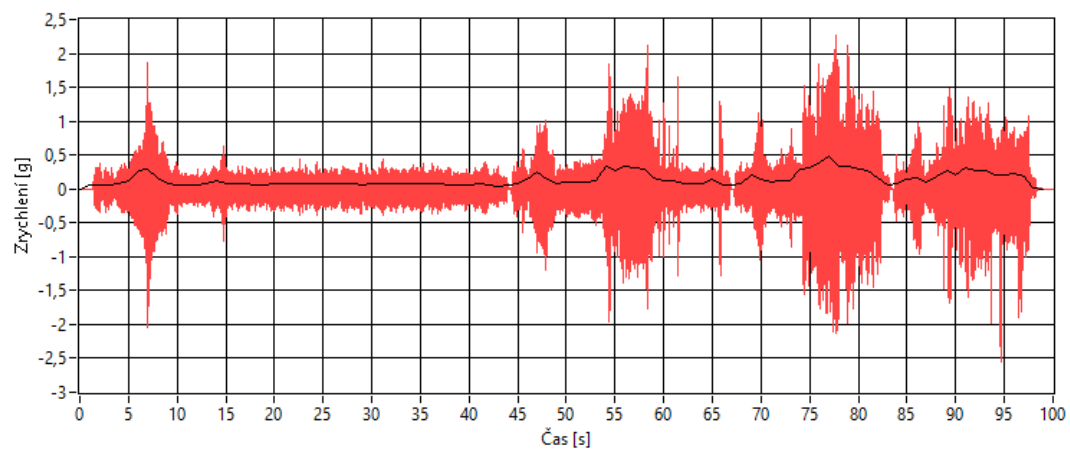
Graf 6 tloušťka 15 mm, akcelerometr Z



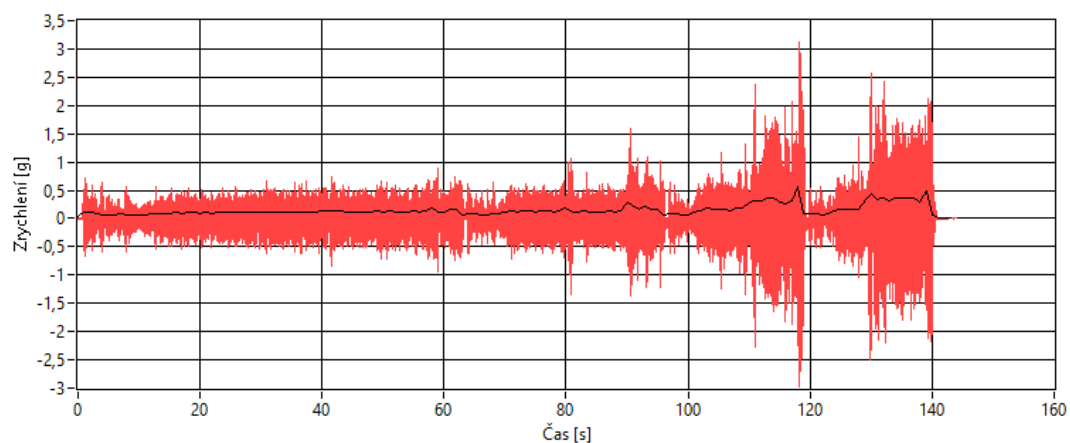
Graf 7 tloušťka 20 mm, akcelerometr X



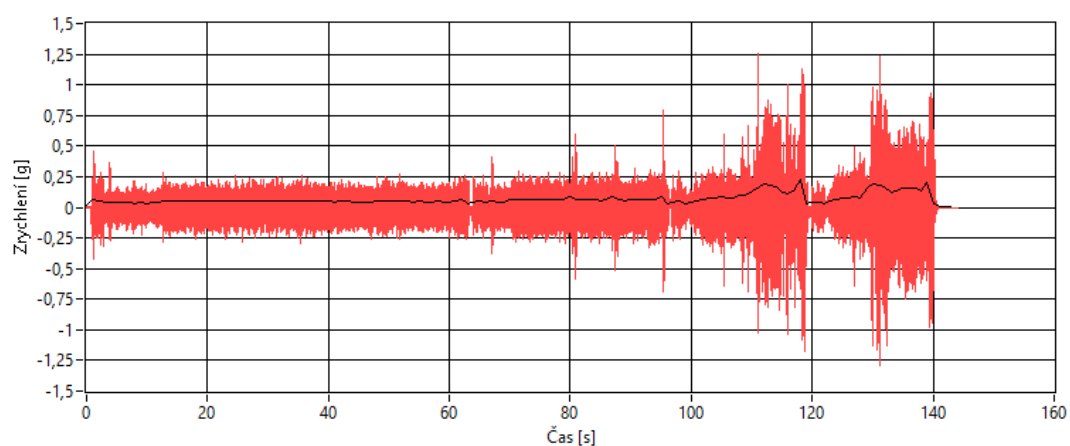
Graf 8 tloušťka 20 mm, akcelerometr Y



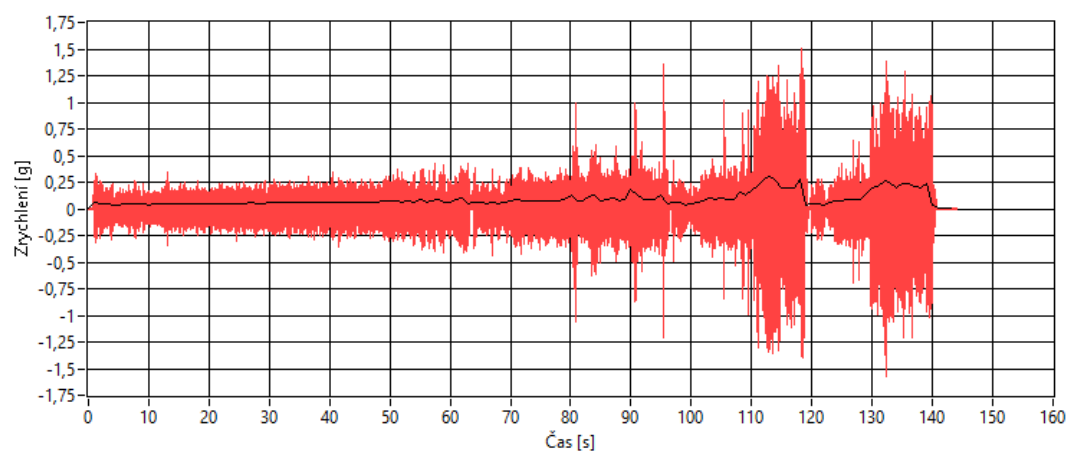
Graf 9 tloušťka 20 mm, akcelerometr Z



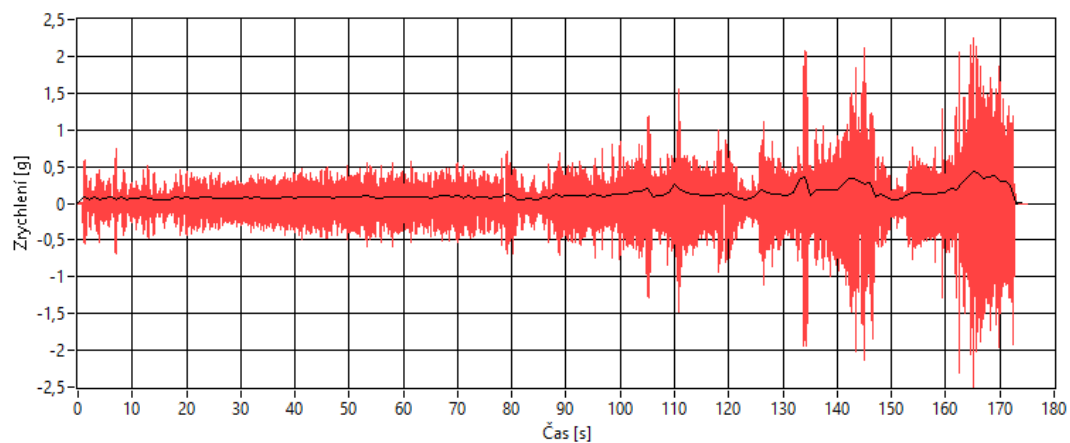
Graf 10 tloušťka 25 mm, akcelerometr X



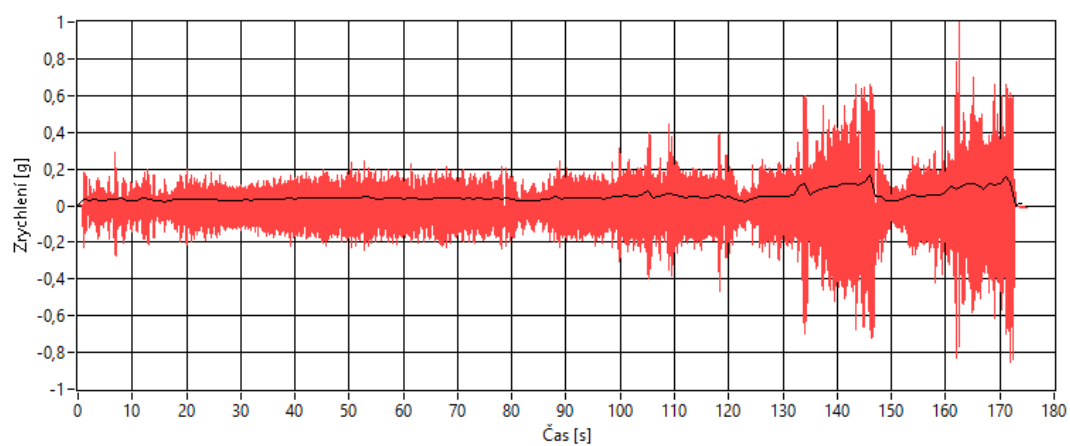
Graf 11 tloušťka 25 mm, akcelerometr Y



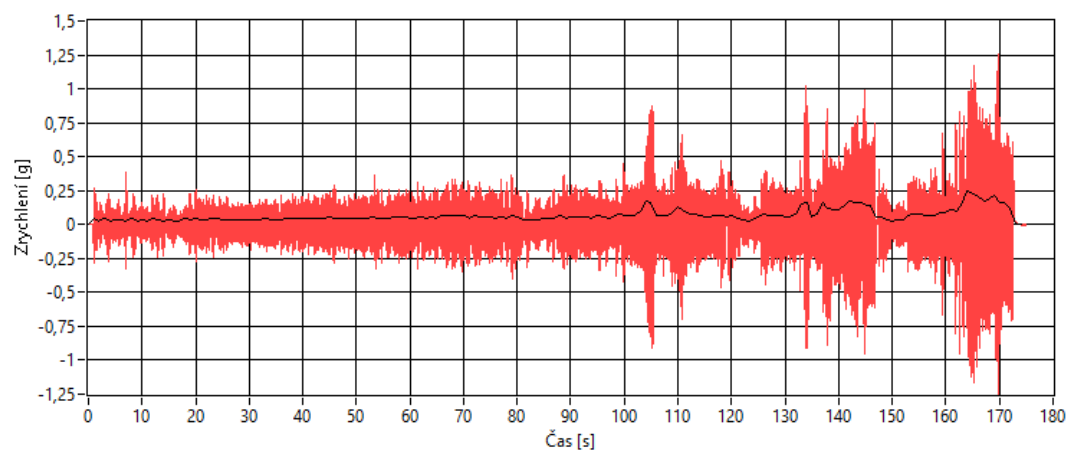
Graf 12 tloušťka 25 mm, akcelerometr Z



Graf 13 tloušťka 30 mm, akcelerometr X

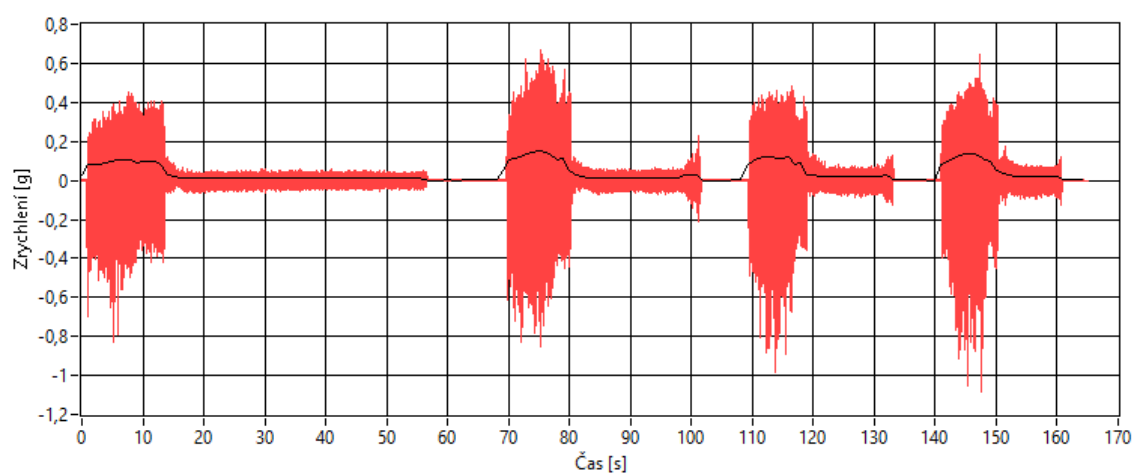


Graf 14 tloušťka 30 mm, akcelerometr Y

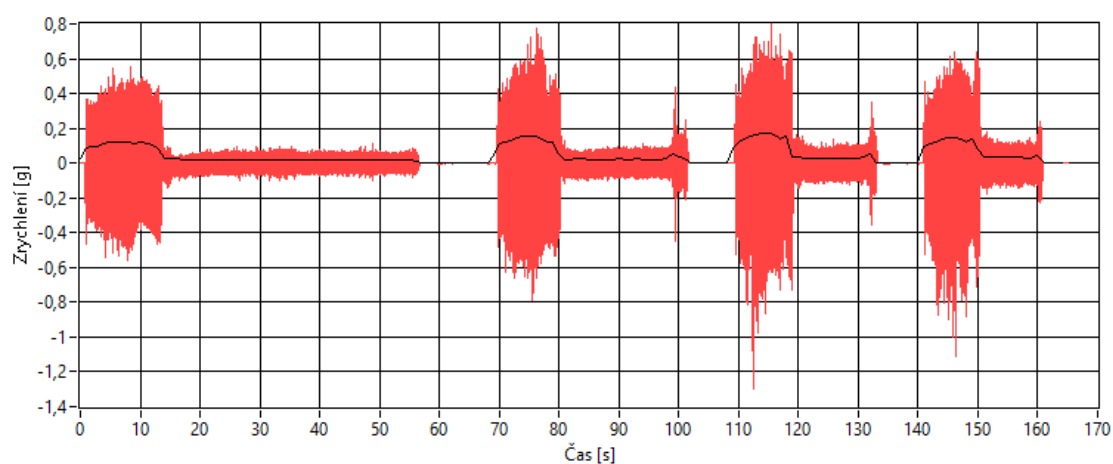


Graf 15 tloušťka 30 mm, akcelerometr Z

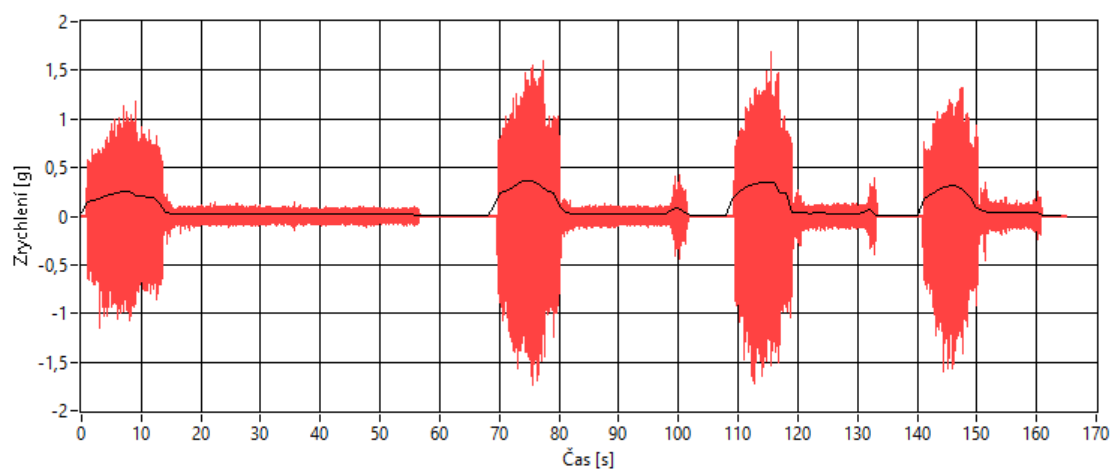
Příloha 3 Časové grafy k 4.4.2 Měření vibrací na duralu při různých parametrech paprsku



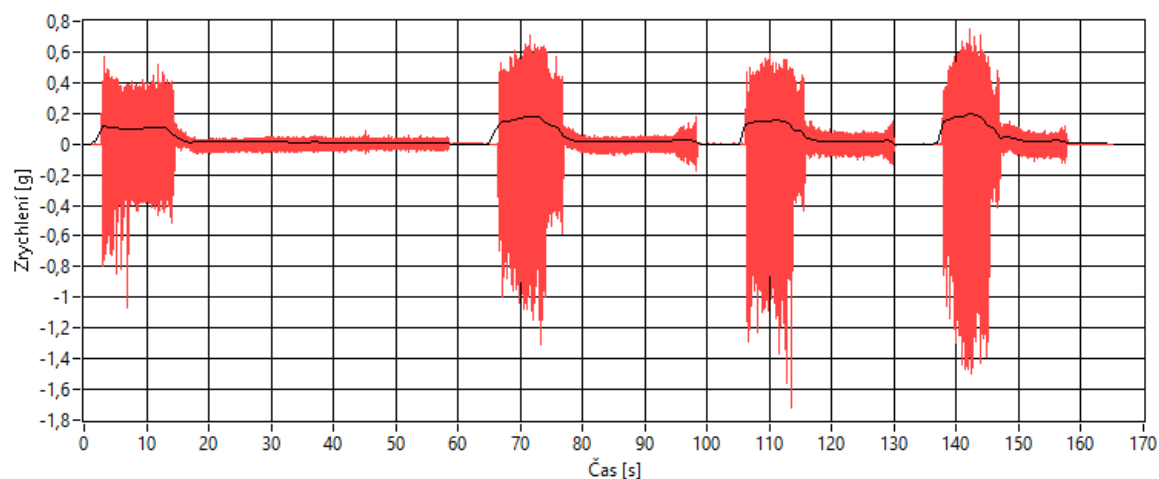
Graf Milano 1 řez A, akcelerometr X



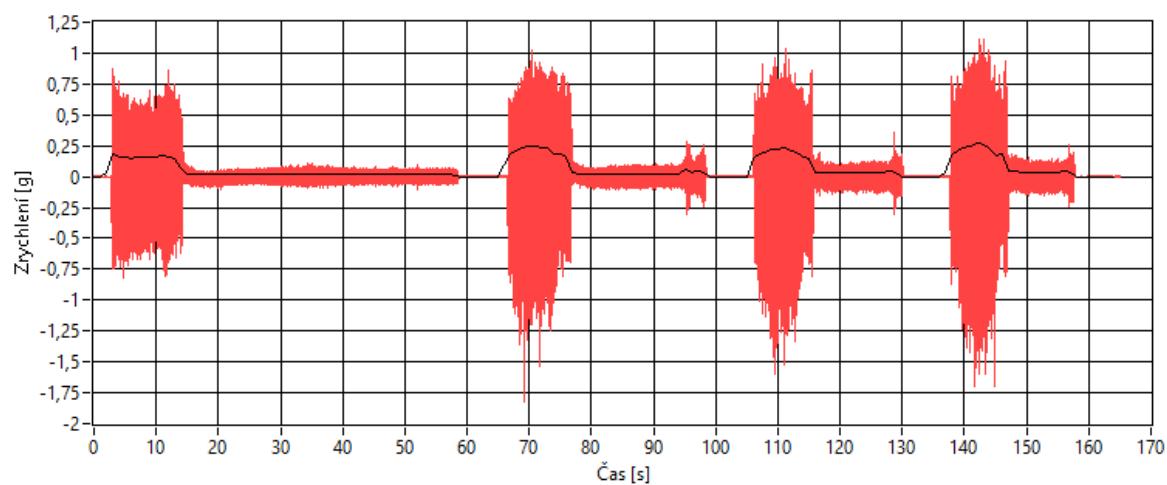
Graf Milano 2 řez A, akcelerometr Y



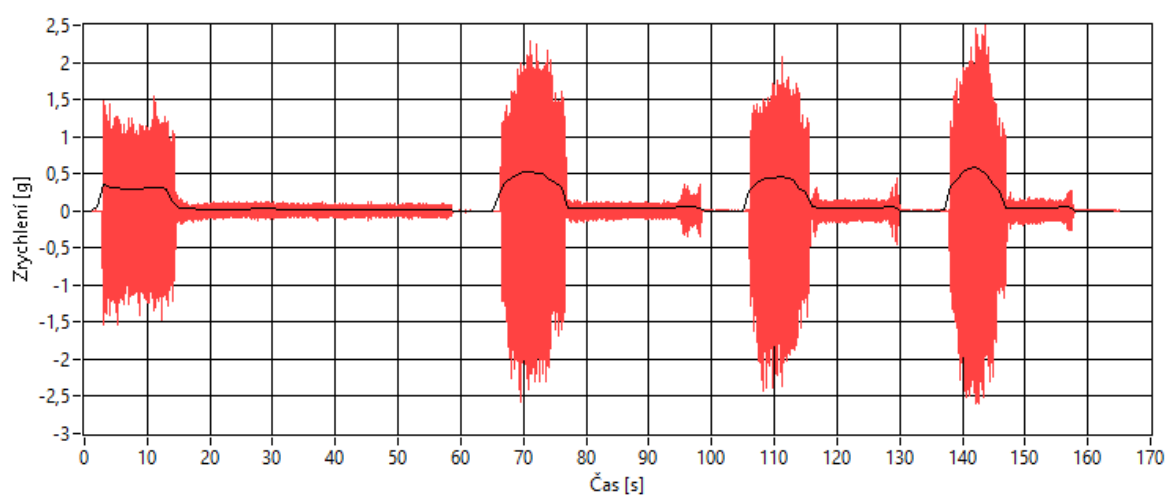
Graf Milano 3 řez A, akcelerometr Z



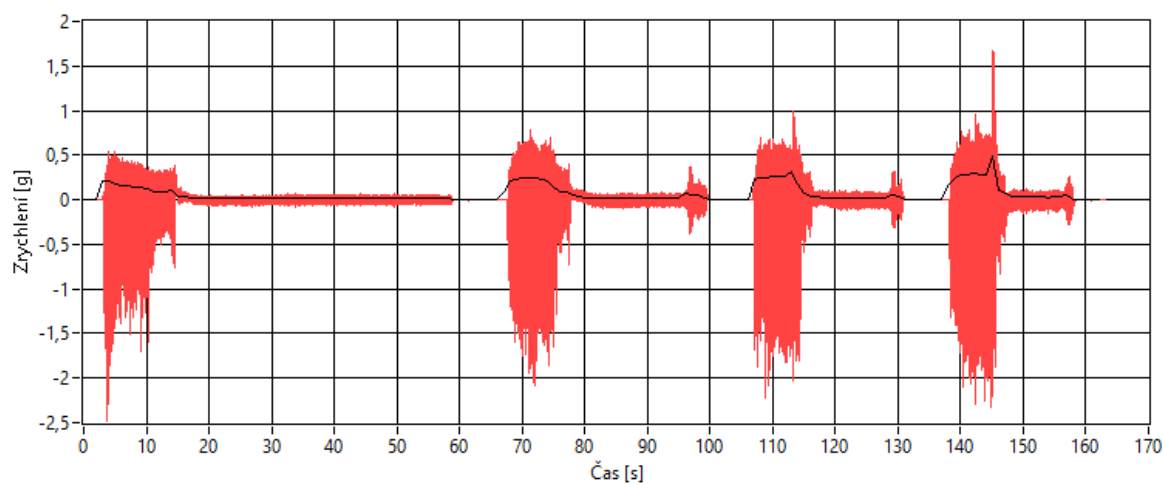
Graf Milano 4 řez B, akcelerometr X



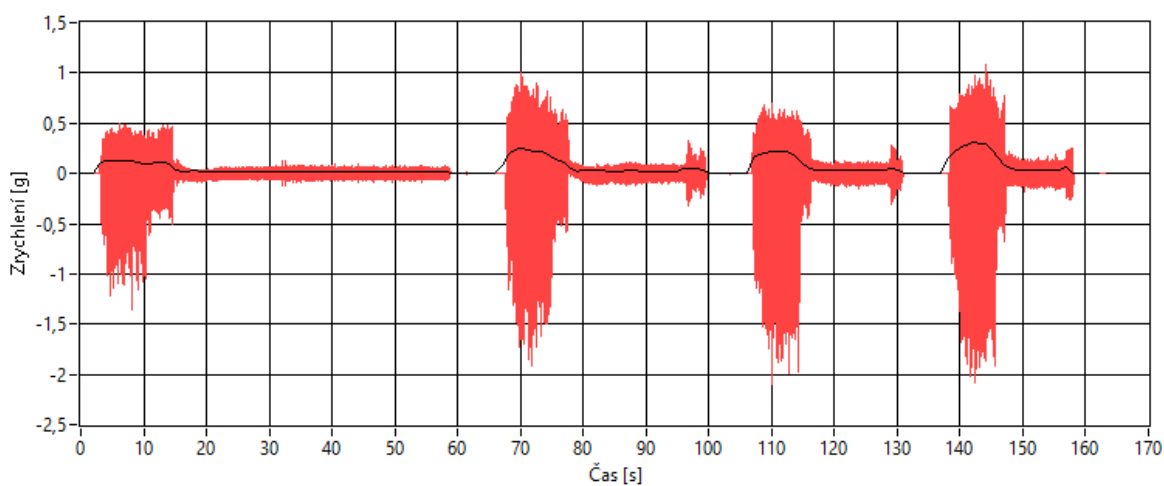
Graf Milano 5 řez B, akcelerometr Y



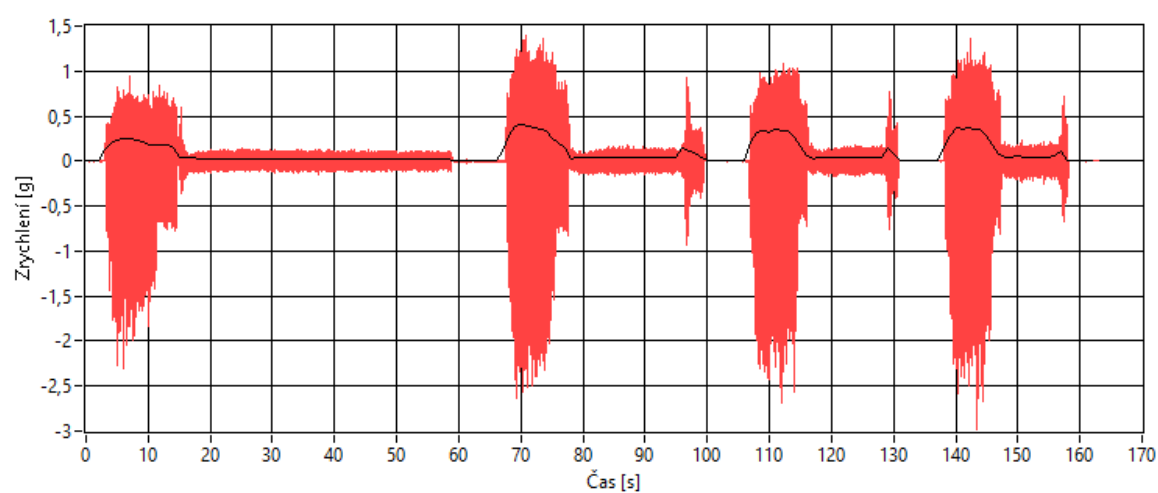
Graf Milano 6 řez B, akcelerometr Z



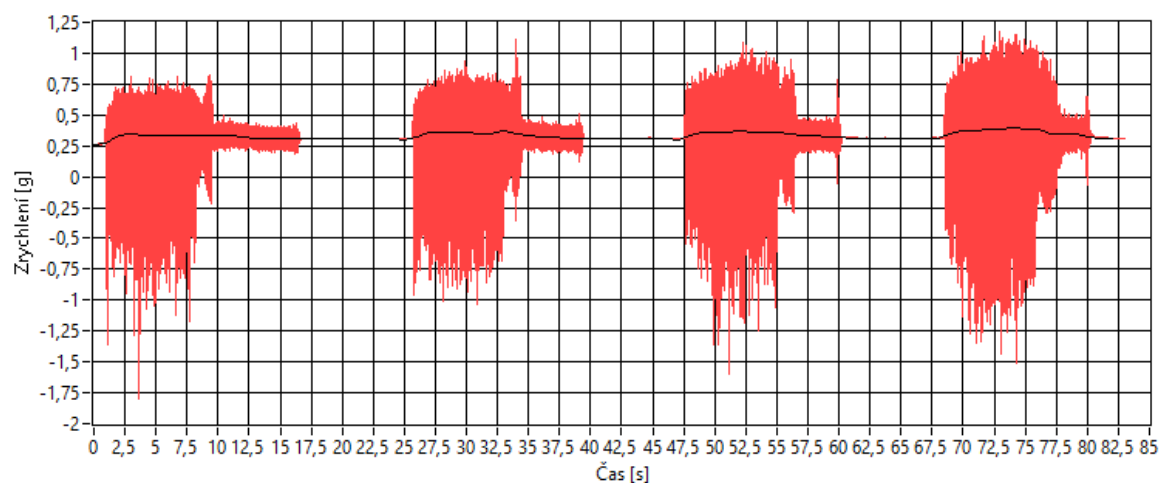
Graf Milano 7 řez C, akcelerometr X



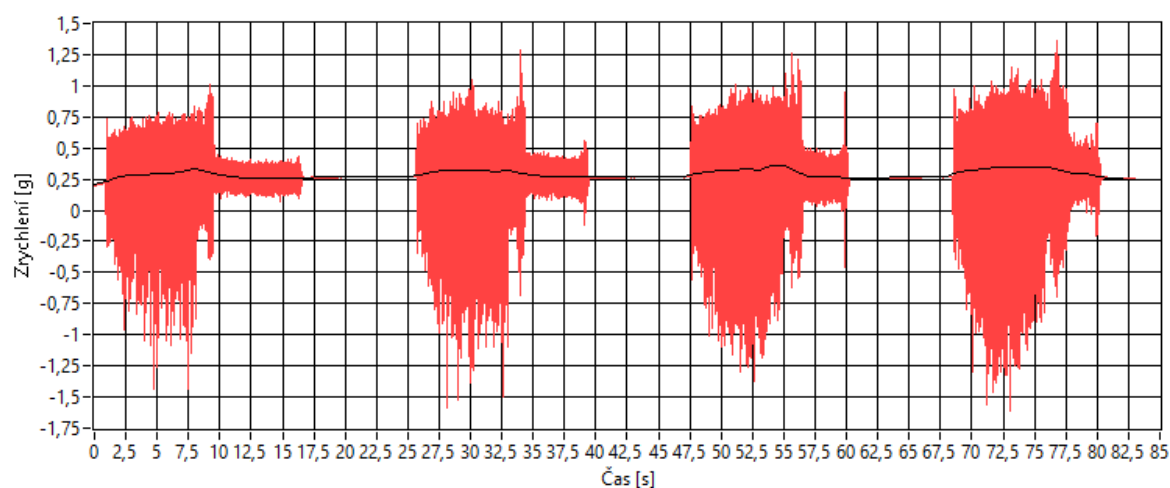
Graf Milano 8 řez C, akcelerometr Y



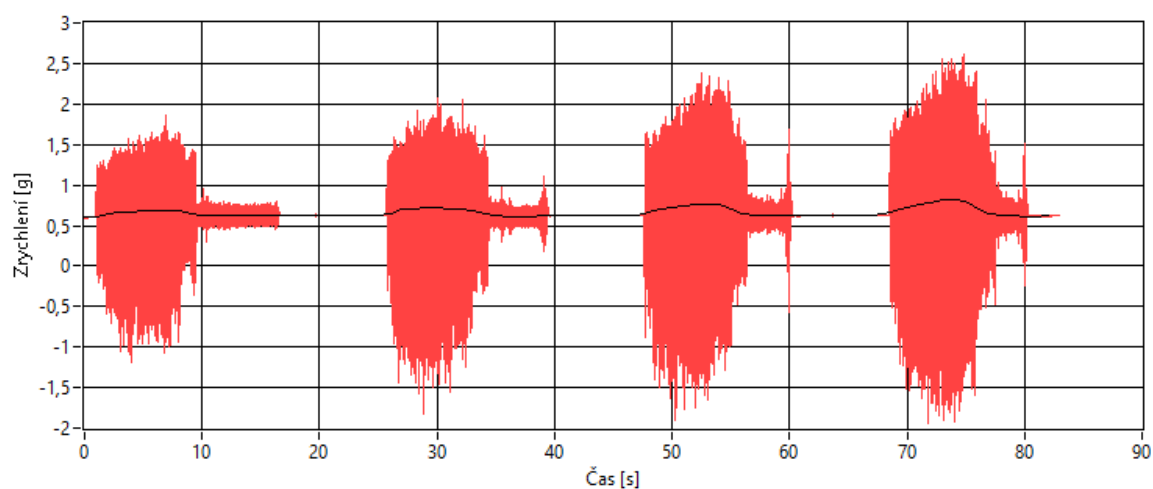
Graf Milano 9 řez C, akcelerometr Z



Graf Milano 10 řez D, akcelerometr X



Graf Milano 11 řez D, akcelerometr Y



Graf Milano 12 řez D, akcelerometr Z